ALBERT EINSTEIN
LEOPOLD INFELD

LA EVOLUCION DE LA FISICA

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

ALBERT EINSTEIN
LEOPOLD INFELD

LA EVOLUCIÓN DE LA FÍSICA

SALVAT

Versión española de la obra The evolution of physics
de Albert Einstein y Leopold Infeld.

Escaneado: (Esp.) Anónimo vía thedoctorwho1967.blogspot.com
(Ing.) Versión original vía archive.org
Edición digital: Sargont (2018)

ISBN 84-345-8246-5 Obra completa
ISBN 84-345-8397-6
Depósito Legal NA-43- 1986
Publicada por Salvat Editores, S.A. - Mallorca, 41-49 – Barcelona
Impresa por Gráficas Estella. Estella (Navarra)
Printed in Spain

PRÓLOGO

Las tentativas del ser humano para comprender el mundo físico que le rodea son tan antiguas como su historia. Durante el siglo XVII, Galileo y Newton dieron un paso de gigante en ese sentido; durante las dos centurias siguientes, sus teorías permitieron un acelerado avance de la física, que culminó con los trabajos de Faraday y Maxwell sobre los fenómenos electromagnéticos.

Pero a finales del siglo pasado se comprobó que ciertos fenómenos físicos resultaban inexplicables según las concepciones clásicas. De los intentos realizados para interpretarlos nacieron dos nuevas revolucionarias teorías: la de la relatividad y la de los cuantos. Los científicos que las hicieron posibles, uno destaca claramente: Albert Einstein, y con razón, porque él fue el creador de la primera y uno de los principales artífices de la segunda.

La mayoría de la gente está convencida de que las nuevas teorías físicas son indescifrables para los no especialistas. Muchos se mostrarían escépticos si alguien les dijera que, en su esencia, dichas teorías son tan comprensibles como los conceptos newtonianos que aprendieron en la escuela (aunque, desde luego, son muy pocos los que están capacitados para hacerlas comprender). Pues bien, no sólo es posible escribir un libro en el que se expliquen los nuevos conocimientos de la física de un modo perfectamente comprensible para el no iniciado, sino que el propio Einstein en colaboración con otro eminente físico, Leopold Infeld escribió un texto de estas características.

PRÓLOGO

Es este libro, La evolución de la física, el que nos honramos en ofrecer al lector de lengua española. En él, Einstein e Infeld describen con un estilo claro y directo los principales conceptos de la física, dando un repaso a las etapas cubiertas por esta rama de la ciencia desde su primera edad de oro, la de Galileo y Newton.

Este libro fue escrito en el ya lejano año de 1938, pero el tiempo no ha pasado para él. Cierto es que, desde aquella fecha hasta hoy, diferentes ramas de la física han experimentado un desarrollo sin precedentes —recordemos por ejemplo la electrónica o las partículas elementales—; pero las teorías que forman su tronco principal siguen incólumes y es de prever que tendrán una larga vida. De todos modos, las escasas actualizaciones que el libro necesita se han añadido en forma de notas al pie de página. Terminamos este prólogo haciendo nuestra una frase que Leopold Infeld escribió años después del fallecimiento de Einstein: «Me siento muy feliz al comprobar que este libro sigue plenamente vivo después de su muerte.»

LOS EDITORES

PREFACIO

Antes de empezar la lectura, espera usted, con derecho, que se le conteste a preguntas muy sencillas: ¿con qué propósito ha sido escrito este libro?, ¿quién es el lector imaginario para el cual se escribió?

Es difícil empezar contestando a estas preguntas de modo claro y convincente. Eso sería mucho más fácil, aunque superfluo, al final del libro. Nos resulta más sencillo decir lo que este libro no pretende ser. No hemos escrito un texto de física. Nuestra intención fue, más bien, describir a grandes rasgos las tentativas de la mente humana para encontrar una conexión entre el mundo de las ideas y el mundo de los fenómenos. Hemos tratado de mostrar las fuerzas activas que obligan a la ciencia a inventar ideas correspondientes a la realidad de nuestro mundo. Pero la explicación ha tenido que ser sencilla. Del laberinto de hechos y conceptos hemos tenido que elegir algún camino real que nos pareció más característico y significativo. Ha habido que omitir hechos y teorías que no se han alcanzado por este camino. Nos vimos forzados por nuestro objetivo general a efectuar una selección cuidadosa de hechos e ideas. La importancia de un problema no debe juzgarse según el número de páginas que se le dedican. Ciertas líneas esenciales del pensamiento no se han introducido, no porque nos hayan parecido faltas de importancia, sino porque no están en o cerca del camino que hemos elegido.

Mientras escribíamos este libro hemos tenido largas discusiones sobre las características de nuestro lector ideal y nos hemos preocupado bastante de él. Lo imaginábamos falto de todo conocimiento concreto de física y matemáticas, pero lleno de un gran número de virtudes. Lo encontrábamos interesado en las ideas físicas y filosóficas y nos veíamos forzados a admirar la paciencia con que lucharía para entender los pasajes de menor interés y de mayor dificultad. Se daría cuenta de que para comprender cualquier página tendría que haber leído cuidadosamente todas las anteriores. Sabría que un libro científico, aunque popular, no debe leerse como una novela.

El libro es una simple charla entre usted y nosotros. Puede usted encontrarla interesante o aburrida, torpe o apasionante; pero nuestro objeto se habrá cumplido si estas páginas le dan una idea de la eterna lucha de la inventiva

humana en su afán de alcanzar una comprensión más completa de las leyes que rigen los fenómenos físicos.

A. E.
L. I.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todos los que tuvieron la amabilidad de ayudarnos con la preparación de este libro, particularmente a:

Los profesores A. G. Shenstone, Princeton, N. J., y Lwow St. Loria, Polonia, por las fotografías de la sección III.

N. Steinberg por sus dibujos.

Dr. M. Phillips por leer el manuscrito y por su amabilísima ayuda.

A. E.
L. I.

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

4. LOS CUANTOS

Láminas

1. GÉNESIS Y ASCENSIÓN DEL PUNTO DE VISTA MECANICISTA

EL GRAN MISTERIO

Imaginemos una novela de misterio perfecta. Este tipo de relato presenta todos los datos y pistas esenciales y nos impulsa a descifrar el misterio por nuestra cuenta. Siguiendo la trama cuidadosamente, podremos aclararlo nosotros mismos un momento antes de que el autor nos dé la solución al final de la obra. Esta solución, contrariamente a los finales de las novelas baratas, nos resulta perfectamente lógica; más aún, aparece en el preciso momento en que es esperada.

¿Podemos comparar al lector de semejante libro con los hombres de ciencia, quienes generación tras generación continúan buscando soluciones a los misterios del gran' libro de la naturaleza? Sólo en parte y superficialmente. En realidad esta comparación no es válida y tendrá que abandonarse luego.

El gran misterio permanece aún sin explicación. Ni siquiera podemos estar seguros de que tenga una solución final. La lectura nos ha hecho progresar mucho; nos ha enseñado los rudimentos del lenguaje de la naturaleza; nos ha capacitado para interpretar muchas claves y ha sido una fuente de gozo y satisfacción en el avance menudo doloroso de la ciencia. A pesar del gran número de volúmenes leídos e interpretados, tenemos conciencia de estar lejos de haber alcanzado una solución completa, si en realidad existe.

En cada etapa tratamos de encontrar una interpretación que tenga coherencia con las claves ya resueltas. Provisionalmente se han aceptado teorías que han explicado muchos hechos, pero no se ha encontrado aún una solución general compatible con todas las claves conocidas. Muy a menudo una teoría que parecía perfecta resultó, más adelante, inadecuada a la luz de nuevos e inexplicables hechos. Cuanto más leemos, tanto más apreciamos la perfecta realización del libro, aun cuando la solución completa parece alejarse a medida que avanzamos hacia ella.

En casi todas las novelas policíacas, desde la aparición de Conan Doyle, existe un momento en el cual el investigador ha reunido todos los datos que cree necesarios para resolver al menos una fase de su problema. Estos datos

parecen, a menudo, completamente extraños, incoherentes y sin relación alguna entre sí. Pero el gran detective se da cuenta, sin embargo, de que no necesita por el momento acumular más datos y de que llegará a su correlación con pensar, y sólo pensar, sobre la investigación que le preocupa.

Por lo tanto, se pone a tocar su violín o se recuesta en un sillón para gozar de una buena pipa; y repentinamente, exclama "¡por Júpiter!, ¡ya está!" Es decir, que ahora ve claramente la relación entre los distintos hechos, antes incoherentes, y los ve vinculados además a otros que no conocía pero que deben de haberse producido necesariamente; tan seguro está nuestro investigador de su teoría del caso, que, cuando lo desee, saldrá a reunir los datos previstos, los cuales aparecerán como él los previó.

El hombre de ciencia, leyendo el libro de la naturaleza, si se nos permite repetir esta trillada frase, debe encontrar la solución él mismo, porque no puede, como suelen hacer ciertos lectores impacientes, saltar hacia el final del libro. En nuestro caso, el lector es al mismo tiempo el investigador, que trata de explicar, por lo menos en parte, los numerosos hechos conocidos. Para tener tan sólo una solución parcial, el hombre de ciencia debe reunir los desordenados datos disponibles y hacerlos comprensibles y coherentes por medio del pensamiento creador. En las páginas siguientes nos proponemos describir a grandes rasgos la labor de los físicos que corresponde a la meditación pura del investigador. Nos ocuparemos principalmente del papel de los pensamientos e ideas en la búsqueda aventurada del conocimiento del mundo físico.

LA PRIMERA CLAVE

Las tentativas de leer el grande y misterioso libro de la naturaleza son tan antiguas como el propio pensamiento humano.

Sin embargo, hace sólo unos tres siglos que los hombres de ciencia han comenzado a entender su lenguaje. Su lectura ha progresado rápidamente desde entonces, es decir, desde Galileo y Newton; nuevas técnicas y métodos sistemáticos de investigación se han desarrollado; ciertas claves han sido resueltas, aun cuando muchas soluciones resultaron temporales y superficiales a la luz de investigaciones posteriores.

El problema del movimiento, uno de los más fundamentales ha sido oscurecido durante miles de años por sus naturales. Todos los movimientos que se observan en la naturaleza —por ejemplo, la caída de una piedra en el aire,

un barco surcando el mar, un carro avanzando por una calle— son en realidad muy intrincados. Para entender estos fenómenos es prudente empezar con los ejemplos más simples y pasar gradualmente a los casos más complicados. Consideremos un cuerpo en reposo en un lugar sin movimiento alguno. Si deseamos cambiar la posición de dicho cuerpo, es necesario ejercer sobre él alguna acción, como empujarlo o levantarlo o dejar que otros cuerpos, tales como caballos o máquinas, actúen sobre él. Nuestro concepto intuitivo del movimiento lo vincula a los actos de empujar, levantar, arrastrar. Múltiples observaciones nos inclinan a pensar que, para que un cuerpo se mueva con mayor rapidez, debemos empujarlo con más fuerza.

Parece natural inferir que, cuanto mayor sea la acción ejercida sobre un cuerpo, tanto mayor será su velocidad. Un carro tirado por cuatro caballos marcha más deprisa que tirado por dos. La intuición nos enseña, pues, que la velocidad está esencialmente vinculada con la acción.

Para los lectores de literatura policíaca, es un hecho familiar el que un falso indicio oscurece la investigación y pospone la solución del problema. El método de razonar dictado por la intuición resultó erróneo y condujo a ideas falsas, sostenidas durante siglos, respecto al movimiento de los cuerpos. La gran autoridad de Aristóteles fue quizá la razón primordial que hizo perpetuar este error durante siglos. En efecto, en su Mecánica puede leerse:

«El cuerpo en movimiento se detiene cuando la fuerza que lo empuja deja de actuar.»

Una de las adquisiciones más importantes en la historia del pensamiento humano, la que señala el verdadero punto inicial de la física, se debe a Galileo, al descubrir y usar el método de razonamiento científico.

Este descubrimiento nos enseñó que no siempre debemos creer en las conclusiones, intuitivas basadas en la observación inmediata, pues conducen a menudo a equivocaciones.

Pero, ¿dónde está el error de la intuición? ¿Es falso decir que un carruaje tirado por cuatro caballos debe correr más velozmente que otro conducido por sólo dos?

Para responder a estas preguntas, vamos a examinar en seguida más de cerca, los hechos fundamentales referentes al movimiento de los cuerpos, empezando con la simple experiencia diaria, familiar a la humanidad desde el principio de la civilización y adquirida en la dura lucha por la existencia.

Supongamos que un hombre que conduce un carrito en una calle horizontal deje de repente de empujarlo. Sabemos que el carrito recorrerá cierto trayecto antes de pararse. Nos preguntamos: ¿será posible aumentar este trayecto, y cómo? La experiencia diaria nos enseña que ello es posible y nos indica varias maneras de realizarlo: por ejemplo, engrasando el eje de las ruedas y haciendo más liso el camino. El carrito irá más lejos cuanto más fácilmente giren las ruedas y cuanto más pulido sea el camino. Pero, ¿qué significa engrasar o aceitar los ejes de las ruedas y alisar el camino? Esto: significa que se han disminuido las influencias externas. Se han aminorado los efectos de lo que se llama roce o fricción, tanto en las ruedas como en el camino. En realidad, esto constituye ya una interpretación teórica, hasta cierto punto arbitrario, de lo observado.

Un paso adelante más y habremos dado con la clave verdadera del problema. Para ello imaginemos un camino perfectamente alisado y ruedas sin roce alguno. En tal caso no habría causa que se opusiera al movimiento y el carrito se movería eternamente.

A esta conclusión se ha llegado imaginando un experimento ideal que jamás podrá verificarse ya que es imposible eliminar toda influencia externa. El experimento ideal dio la clave que constituyó la verdadera fundamentación de la mecánica del movimiento.

Comparando los dos métodos expuestos, se puede decir que: intuitivamente, a mayor fuerza corresponde mayor velocidad: luego, la velocidad de un cuerpo nos indicará si sobre él obran o no fuerzas. Según la clave descubierta por Galileo, si un cuerpo no es empujado o arrastrado, en suma, si sobre él no actúan fuerzas exteriores, se mueve uniformemente, es decir, con velocidad constante y en línea recta. Por lo tanto, la velocidad de un cuerpo no es indicio de que sobre él actúen o no fuerzas exteriores. La conclusión de Galileo, que es la correcta, la formuló una generación después.

Newton, con el nombre de principio de inercia. Es, generalmente, una de las primeras leyes de la física que aprendemos de memoria en los colegios, y muchos la recordarán. Dice así:

«Un cuerpo en reposo, o en movimiento, se mantendrá en reposo, o en movimiento rectilíneo y uniforme, a menos que sobre él actúen fuerzas exteriores que lo obliguen a modificar dichos estados.»

Acabamos de ver que la ley de inercia no puede inferirse directamente de la experiencia, sino mediante una especulación del pensamiento, coherente

con lo observado. El experimento ideal no podrá jamás realizarse, a pesar de que nos conduce a un entendimiento profundo de las experiencias reales.

De entre la variedad de los complejos movimientos que encontramos en el mundo que nos rodea, hemos elegido como primer ejemplo el movimiento uniforme, por ser el más simple, ya que en este caso no actúan fuerzas exteriores. Las condiciones que determinan el movimiento uniforme no pueden, sin embargo obtenerse: una piedra que arrojemos desde lo alto de una torre, un carro que empujemos a lo largo de una calle, no se moverán uniformemente, porque nos es imposible eliminar las influencias exteriores. En una buena novela de misterio la clave más evidente conduce a menudo a suposiciones erróneas. En nuestro intento de entender las leyes de la naturaleza encontramos, también, que la explicación intuitiva más evidente es a menudo equivocada.

El pensamiento crea una imagen del Universo, eternamente cambiante. La contribución de Galileo consiste en haber destruido el punto de vista intuitivo, que reemplazó por uno nuevo. En eso estriba la importancia del descubrimiento de Galileo.

Aquí se nos presenta, inmediatamente, un nuevo problema: ¿qué cosa, en el movimiento de un cuerpo, indicará la acción de fuerzas exteriores, si la velocidad no la revela? La respuesta a esta pregunta la encontró Galileo. Pero se debe a Newton su formulación precisa, que constituye una guía más en nuestra investigación.

Para descubrir dicha respuesta debemos analizar ahora más profundamente el caso del carrito en movimiento sobre una calle perfectamente lisa. En nuestro experimento ideal, la uniformidad del movimiento se debía a la ausencia de toda fuerza externa. Imaginemos que nuestro móvil reciba un impulso en el sentido de su desplazamiento.

¿Qué sucederá entonces? Resulta obvio que su velocidad aumentará.

En cambio, un empuje en sentido opuesto haría disminuir su velocidad. En el primer caso el carrito aceleró y en el segundo aminoró su velocidad; de esto surge en el acto la conclusión siguiente: La acción de una fuerza exterior se traduce en un cambio de velocidad. Luego, no es la velocidad misma sino su variación lo que resulta como consecuencia de la acción de empujar o arrastrar. Galileo lo vio claramente y escribió en su obra *Dos ciencias nuevas*:

«Toda velocidad, una vez impartida a un cuerpo, se conservará sin alteración mientras no existan causas externas de aceleración o frenado, condición que se cumple solamente sobre los planos horizontales; pues el movimiento

de un cuerpo que cae por una pendiente se acelera, mientras que el movimiento hacia arriba se frena; de esto se infiere que el movimiento sobre un plano horizontal es perpetuo; pues, si la velocidad es uniforme, no puede disminuirse o mermarse, y menos aún destruirse.»

Siguiendo la clave correcta, logramos un entendimiento más profundo del problema del movimiento. La relación entre la fuerza y el cambio de velocidad, y no, como pensaríamos de acuerdo con nuestra intuición, la relación entre la fuerza y la velocidad misma, constituye la base de la mecánica clásica, tal como fue formulada por Newton. Hemos estado haciendo uso de dos conceptos que tienen papel principal en la mecánica clásica: fuerza y cambio de velocidad. En el desarrollo ulterior de la ciencia, ambos conceptos se ampliaron y generalizaron. Por eso debemos examinarlos más detenidamente.

¿Qué es una fuerza? Intuitivamente sentimos qué es lo que se quiere significar con este término. El concepto se originó en el esfuerzo, sensación muscular que acompaña a cada uno de los actos de empujar, arrastrar o arrojar. Pero su generalización va mucho más allá de estos sencillos ejemplos. Se puede pensar en una fuerza aun sin imaginarnos un caballo tirando de un carruaje. Hablamos de la fuerza de atracción entre la Tierra y el Sol, entre la Tierra y la Luna, y de las fuerzas que producen las mareas. Se habla de la fuerza con que la Tierra nos obliga, como a todos los objetos que nos rodean, a permanecer dentro de su esfera de influencia, y de la fuerza con que el viento produce las olas del mar o mueve las ramas de los árboles. Dondequiera que observemos un cambio de velocidad, debemos hacer responsable de ello a una fuerza exterior, en el sentido general de la palabra. Al respecto escribe Newton en sus *Principia*:

«Una fuerza exterior es una acción que se ejerce sobre un cuerpo, con el objeto de modificar su estado, ya de reposo, ya de movimiento rectilíneo y uniforme.

La fuerza consiste únicamente en su acción y no permanece en el cuerpo cuando deja de actuar aquélla. Pues un cuerpo se mantiene en cualquier nuevo estado que adquiera, gracias a su *vis inertiae* únicamente. Las fuerzas pueden ser de origen muy distinto, tales como percusión, presión o fuerza centrífuga.»

Si se arroja una piedra desde lo alto de una torre, su movimiento no es uniforme, su velocidad aumenta a medida que va cayendo. En consecuencia: debe de actuar, en el sentido de su movimiento, una fuerza exterior. En otras

palabras: la piedra es atraída por la Tierra. ¿Qué sucede cuando arrojamos un cuerpo hacia arriba? Su velocidad decrece hasta que alcanza su punto más alto y entonces empieza a caer. Esta disminución de la velocidad tiene como causa la misma fuerza que la acelera durante la caída. En un caso la fuerza actúa en el sentido del movimiento, y en el otro, en sentido opuesto. La fuerza es la misma, pero provoca un aumento o una disminución de la velocidad según que el cuerpo se mueva hacia abajo o hacia arriba.

VECTORES

Los movimientos que hemos considerado son *rectilíneos*, esto es, a lo largo de una línea recta. Ahora debemos dar un paso hacia delante. Resulta más fácil entender las leyes de la naturaleza si analizamos los casos más simples dejando de lado, al principio, los casos más complejos. Una línea recta es más simple que una curva. Sin embargo es imposible quedarnos satisfechos sólo con un entendimiento del movimiento rectilíneo. Los movimientos de la Luna, de la Tierra y de los planetas, a los que, precisamente se han aplicado los principios de la mecánica con éxito tan brillante, son todos movimientos curvilíneos. Al pasar del movimiento rectilíneo al movimiento a lo largo de una trayectoria curva, aparecen nuevas dificultades. Debemos tener la valentía de sobreponeros estas dificultades, si deseamos comprender los principios de la mecánica clásica que nos dieron las primeras claves y que constituyeron el punto de partida en el desarrollo de la ciencia.

Consideremos otro experimento ideal en que una esfera perfecta rueda uniformemente sobre una mesa pulida: Ya sabemos que si a dicha esfera se le da un impulso, es decir, si se le aplica una fuerza exterior, su velocidad variará. Supongamos, ahora, que la dirección del golpe no sea la del movimiento, sino diferente; por ejemplo, perpendicular a él. ¿Qué le sucede a la esfera? Se pueden distinguir tres fases del movimiento: el movimiento inicial, la acción de la fuerza y el movimiento final al cesar la acción de la fuerza. De acuerdo con el principio de inercia, las velocidades, antes y después de la acción de la fuerza, son constantes. Pero hay una diferencia entre los movimientos uniformes de antes y después de dicha acción: ha cambiado la dirección. La trayectoria inicial de la esfera y la dirección de la fuerza son perpendiculares entre sí, según dijimos. El movimiento final tendrá una dirección intermedia, que será más próxima a la de la fuerza si el golpe es recio y la velocidad inicial pequeña; y será más cercana a la trayectoria del movimiento

primero, si el impulso es pequeño y la velocidad inicial grande. Basados en la ley de la inercia, llegamos a la siguiente conclusión: en general, la acción de una fuerza exterior modifica, no sólo la velocidad, sino también la dirección del movimiento. La comprensión de este hecho nos prepara para la generalización introducida en la física con el concepto de *vector*.

Podemos continuar usando el método de razonamiento directo empleado hasta ahora. El punto inicial es nuevamente la ley de inercia, de Galileo. Estamos lejos aún de haber agotado las consecuencias de esta valiosa clave del arduo problema del movimiento.

Consideremos dos esferas en movimiento en distintas direcciones sobre una mesa pulida; concretando, supongamos que dichas direcciones son perpendiculares. Como no obran fuerzas exteriores, los movimientos serán perfectamente uniformes. Supongamos, además, que tienen la misma velocidad, esto es, que ambas recorran la misma distancia en el mismo tiempo. Pero ¿es correcto decir que ambas esferas tienen la misma velocidad? La respuesta puede ser afirmativa o negativa. Si los velocímetros de dos automóviles señalan cuarenta kilómetros por hora cada uno, es costumbre que ambos coches corren con igual rapidez o velocidad, sin tener en cuenta las direcciones en que marchan. Pero la ciencia se ve obligada a crear su propio lenguaje, sus propios conceptos para su uso exclusivo. Los conceptos científicos comienzan a menudo con los que se usan en el lenguaje ordinario para expresar los hechos cotidianos, pero se desarrollan de modo diferente. Se transforman pierden la ambigüedad usual en el lenguaje común, ganando e exactitud para poder ser aplicados al pensamiento científico.

Desde este punto de vista resulta ventajoso decir que las velocidades de las dos esferas que se mueven en distintas direcciones son distintas. Aun cuando sea cosa puramente convencional, es más conveniente decir que cuatro automóviles que se alejan de una misma plaza de estacionamiento por distintas carreteras no llevan las mismas velocidades, aun cuando su rapidez, registrada por los velocímetros, sea en todos cuarenta kilómetros por hora. Esta diferencia entre rapidez y velocidad ilustra cómo la física, empezando con un concepto que se usa en la vida diaria, lo modifica de tal manera que resulta fructífero en el desarrollo ulterior de la ciencia.

El resultado de medir cierta longitud se expresa como determinado número de unidades. La longitud de una barra es, por ejemplo, de 3 metros y 7 centímetros; el peso de un objeto, 2 kilos y 300 g; determinado intervalo de tiempo se dará en tantos minutos y segundos. En cada uno de estos casos, el resultado de la medida es expresado por un número. Un número solo es, sin

embargo, insuficiente para describir algunos conceptos físicos. El reconocimiento de este hecho marca un notable progreso en la investigación científica. Para caracterizar una velocidad es tan esencial indicar su dirección como el número que determina su valor. Tal magnitud se llama vectorial; se representa por una flecha o vector. Es decir, la velocidad puede ser representada por una flecha o *vector* cuya longitud, en determinada escala o unidad, mide su rapidez, y cuya dirección es la del movimiento.

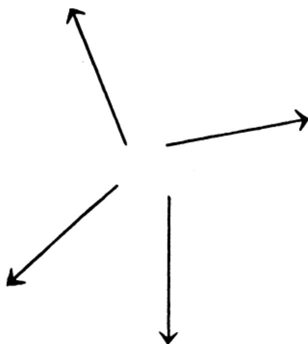


Fig. 1

Si cuatro automóviles divergen con igual rapidez partiendo de un mismo lugar, sus velocidades pueden representarse con cuatro vectores de igual longitud, como los de la figura 1. En la escala usada, un centímetro corresponde a 20 kilómetros por hora. De esta manera, cualquier velocidad puede estar representada por un vector; inversamente dada la escala, se puede determinar el valor de la velocidad por el vector que la representa.

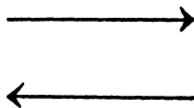


Fig. 2

Si dos automóviles se cruzan en el camino y los velocímetros de ambos coches marcan 50 km por hora, caracterizamos sus velocidades por medio de dos vectores que se diferencian por el sentido opuesto que señalan sus flechas. Así también, las flechas que en las carreteras nos indican en qué sentido debemos viajar para acercarnos o alejarnos de una ciudad tienen sentidos opuestos (v. fig. 2).

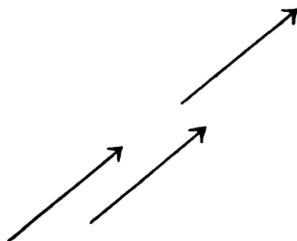


Fig.3

Todos los trenes que con igual rapidez se mueven hacia una ciudad y se encuentran en distintas estaciones, sobre una misma vía o sobre vías paralelas, tienen una misma velocidad. Y todos ellos pueden estar representados con un mismo vector. En otras palabras, de acuerdo con la convención aceptada, los vectores de la figura 3 pueden considerarse como iguales, pues están sobre una misma recta o rectas paralelas, tienen igual longitud y la misma dirección.

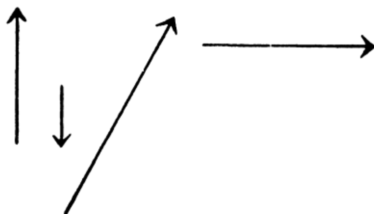


Fig. 4

La figura 4 muestra varios vectores diferentes entre sí, por ser de distinta longitud o diferente dirección o ambas cosas a la vez. Los mismos vectores están dibujados en la figura 5 partiendo de un punto común. Como el punto de origen no hace al caso, estos vectores pueden representar las velocidades de cuatro automóviles que se alejan de un mismo lugar o las velocidades de cuatro coches que, en distintos lugares de un país, viajan con las velocidades y en las direcciones indicadas.

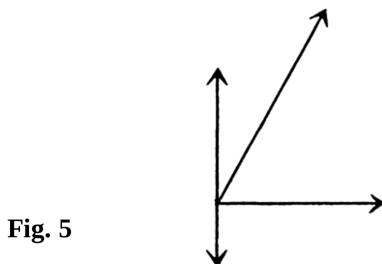


Fig. 5

Esta representación vectorial puede usarse ahora para describir los hechos ya tratados con referencia al movimiento rectilíneo. Hemos citado el caso de un carro que, moviéndose uniformemente y en línea recta, recibe un empuje, en el sentido de su movimiento, que acrecienta su velocidad. Esto puede representarse gráficamente por medio de dos vectores, como los de la figura 6; el más corto (1) corresponde a la velocidad primitiva y el más largo (2), de igual dirección y sentido que el anterior, a la velocidad después del empuje. El significado del vector punteado resulta claro: representa el cambio de velocidad debido al impulso.

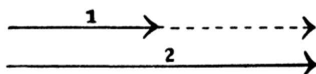


Fig. 6

En el caso en que la fuerza actúa en contra del movimiento frenándolo, el diagrama vectorial es algo distinto (está representado en la figura 7). También en este caso el vector punteado indica el cambio de velocidad que tiene sentido opuesto al del movimiento. Resulta claro que no sólo las velocidades son vectores, sino también sus variaciones. Pero todo cambio de velocidad se debe a la acción de una fuerza exterior; luego la fuerza debe estar representada, también, por un vector. Con el fin de caracterizar la fuerza, no es suficiente establecer la intensidad del empuje; tenemos que especificar su dirección. La fuerza, repetimos, como la velocidad o su cambio, se representa por un vector y no por un número solamente. El vector que representa la fuerza exterior que actúa sobre el carro de nuestro ejemplo debe tener el mismo sentido que el cambio de velocidad. En las figuras 6 y 7 los vectores punteados, que representan los cambios de velocidad, muestran también la dirección y el sentido de las fuerzas actuantes.

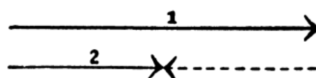


Fig. 7

Un escéptico podría señalar que no ve ventaja alguna en la introducción de los vectores. Todo lo que acabamos de expresar viene a ser sólo la traducción a un lenguaje complicado y desusado de hechos previamente conocidos. Reconocemos que a esta altura de nuestra exposición sería ciertamente difícil convencerlo de que está equivocado. Pero veremos que precisamente este extraño lenguaje conduce a una generalización importante en la cual los vectores desempeñan un papel esencial.

EL ENIGMA DEL MOVIMIENTO

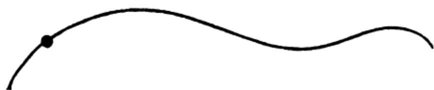
Mientras nos ocupemos únicamente del movimiento en línea recta estaremos lejos de comprender los movimientos observados en la naturaleza. Para entenderlos nos vemos obligados a estudiar movimientos sobre trayectorias curvas y determinar las leyes que los rigen. Esto no es asunto fácil. En el caso del movimiento rectilíneo, nuestros conceptos de velocidad, cambio de velocidad y fuerza resultaron muy útiles. Pero no se ve inmediatamente cómo los podremos aplicar al caso de trayectorias curvilíneas. Se puede evidentemente pensar que los conceptos anteriores son inadecuados para la descripción de cualquier movimiento y que debemos crear conceptos nuevos. ¿Nos convendrá seguir el camino anterior o buscar otro?

La generalización es un proceso que se emplea muy a menudo en la ciencia. El método de generalización no está determinado unívocamente, pues hay usualmente numerosas maneras de llevarla a cabo. Sin embargo, debe satisfacerse un requisito: todo concepto generalizado se debe reducir al concepto original cuando se restablecen las condiciones primitivas.

Esto se entenderá mejor al aplicarlo al caso que nos ocupa. En efecto, se puede intentar la generalización de los anteriores conceptos de velocidad, cambios de velocidad y fuerza, para el caso del movimiento curvilíneo. Cuando se habla de curvas, técnicamente, se incluye entre ellas a las líneas rectas. La recta es un caso particular y trivial del concepto más general de curva. Luego, si introducimos la velocidad, el cambio de velocidad y la fuerza para el movimiento curvilíneo, estos conceptos quedan automáticamente definidos, también, para el movimiento rectilíneo. Pero este resultado no tiene que contradecir los previamente obtenidos. Si la curva se transforma en una línea recta, todos los conceptos generalizados tienen que transformarse en los que usamos en la descripción del movimiento rectilíneo. Esta restricción no es suficiente para determinar la generalización unívocamente. Deja abiertas

muchas posibilidades. La historia de la ciencia nos enseña que las generalizaciones más simples resultan a veces adecuadas y otras veces no. En nuestro caso resulta relativamente simple acertar con la generalización correcta. Los nuevos conceptos probaron su utilidad al permitirnos entender el movimiento de un cuerpo arrojado en el aire, como el movimiento de los cuerpos celestes, etc.

Fig. 8



¿Qué significan las palabras velocidad, cambio de velocidad y fuerza, en el caso del movimiento curvilíneo? Empecemos con el concepto de velocidad. Supongamos que un cuerpo muy pequeño se mueve de izquierda a derecha, describiendo la curva de la figura 8. Un cuerpo pequeño se llama a menudo *partícula*. El punto sobre la curva de esta figura indica la posición de la partícula en cierto instante. ¿Cómo es la velocidad correspondiente a esta posición y a este tiempo? La clave descubierta por Galileo nos insinúa la solución del problema. Una vez más, tenemos que usar nuestra imaginación y pensar en una experiencia ideal. La partícula se mueve sobre la curva, de izquierda a derecha, bajo la influencia de fuerzas exteriores. Supongamos que en un instante dado, dejan de obrar sobre la partícula todas las fuerzas. De acuerdo con el principio de inercia, el movimiento, a partir de ese instante, debe ser uniforme. En la práctica, resulta evidentemente imposible librar a un cuerpo de toda influencia exterior. Pero nos podemos preguntar: "¿qué pasaría si…?" y juzgar la validez de nuestro conjetura por las conclusiones que de ella se pueden derivar y por su acuerdo con la experimentación.

Fig. 9

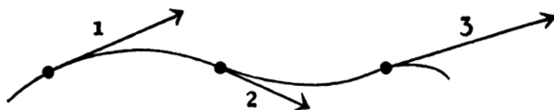


El vector de la figura 9 indica la dirección imaginada del movimiento uniforme si se anulan todas las fuerzas exteriores. Es la dirección de la tangente al punto de la curva que ocupa la partícula en el instante de desaparecer las fuerzas. Si se observa el movimiento de una partícula con un microscopio, se ve una parte muy pequeña de la curva que aparece como un minúsculo segmento rectilíneo. La tangente es su prolongación. Por lo tanto, el vector de la figura representa la velocidad en un instante determinado; es decir, el vector

velocidad está sobre la tangente a la trayectoria. Su longitud da la magnitud de la velocidad, o sea la rapidez indicada, por ejemplo, por el velocímetro de un auto.

Nuestro experimento ideal, de destruir el movimiento con el objeto de encontrar el vector velocidad, no debe tomarse demasiado literalmente. Sólo nos ayuda a comprender el significado del vector velocidad y nos permite hallarlo en un punto y en un instante arbitrarios.

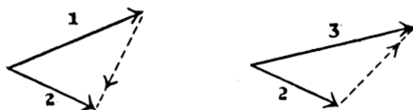
Fig. 10



En la figura 10, se muestra el vector velocidad correspondiente a tres posiciones diferentes de la partícula móvil sobre la curva trayectoria. En este caso, además de la dirección, varía también la magnitud de la velocidad, lo que se representa con las distintas longitudes de los 3 vectores, 1, 2 y 3.

¿Satisfará esta nueva manera de definir la velocidad el requisito indispensable a toda generalización? Esto es: ¿se reduce al concepto primitivo de velocidad, si la curva se transforma en una recta? Es obvio que sí; pues la tangente a una recta coincide con la misma. Luego, en este caso el vector velocidad estará sobre la línea del movimiento, exactamente igual que en los casos anteriores del carro móvil y de las esferas rodantes. Introduzcamos, ahora, el concepto generalizado de cambio de velocidad. Esto puede hacerse también de varias maneras, de las cuales escogeremos la más simple y conveniente.

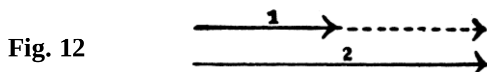
Fig. 11



La figura 10 muestra varios vectores velocidad, que representan el movimiento en otros tantos puntos de la trayectoria. Los dos primeros pueden dibujarse como en la figura 11, partiendo de un mismo punto, lo que es posible de acuerdo con nuestra definición de vector. El vector punteado representa el cambio de velocidad. Su origen coincide con el final de (1) y su extremo final con el del vector (2). Esta definición del vector cambio de velocidad puede parecer, al principio, artificial y hasta sin sentido. Resulta más clara al aplicarla al caso especial en que los vectores (1) y (2) tienen igual dirección. Esto significa, naturalmente, pasar al movimiento rectilíneo. Si los dos vectores tienen un mismo origen, el vector punteado une nuevamente sus extremos

finales (fig. 12). Esta representación resulta idéntica a la de la figura 6 y se recupera el concepto primitivo como un caso especial del generalizado. Hacemos resaltar que en dichas figuras se han separado las dos líneas de las velocidades para que no resulten superpuestas e indiscernibles.

Fig. 12



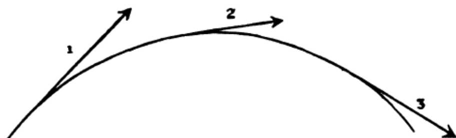
Nos queda por dar el último y más importante paso de nuestro proceso de generalización. Debemos establecer la relación entre la fuerza y el cambio de velocidad, para poder formular la clave que nos permita entender el problema general del movimiento.

La clave de la interpretación del movimiento rectilíneo es simple: fuerzas exteriores son responsables de los cambios de velocidad; el vector fuerza tiene la misma dirección y sentido que estos cambios. ¿Y cuál será la clave que resuelva el problema del movimiento curvilíneo? ¡Exactamente la misma! la única diferencia es que el cambio de velocidad tiene, aquí, un significado más amplio. Un vistazo a los vectores punteados de la figura 11 aclara este punto perfectamente. Si se conoce la velocidad en todos los puntos de la trayectoria, se puede deducir en el acto la dirección de la fuerza en un punto cualquiera. Para esto hay que trazar los vectores de la velocidad correspondientes a dos instantes separados por un lapso pequeñísimo y, por ende, referentes a dos posiciones muy próximas entre sí. La flecha que parte del final del primer vector y termina en el del segundo da la dirección y sentido de la fuerza actuante. Pero es esencial, repetimos, que los dos vectores velocidad que se tomen estén separados por un intervalo de tiempo “muy corto”. El análisis riguroso de las expresiones “muy cerca”, “muy corto”, no es tan fácil. Fue precisamente este análisis el que condujo a Newton y a Leibniz al descubrimiento del cálculo diferencial que es la senda trabajosa y árida que lleva a la generalización de la clave de Galileo.

No podemos mostrar aquí cuán múltiples y fructíferas han resultado las consecuencias de esa generalización. Su aplicación conduce a una explicación simple y convincente de muchos hechos antes Incoherentes e ininteligibles.

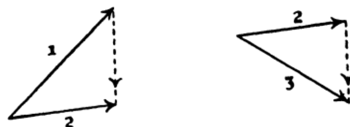
Entre la gran diversidad de movimientos tomaremos uno de los más simples, al que aplicaremos para su interpretación la ley que acabamos de formular.

Fig.13



Una bala de cañón, una piedra lanzada con cierta inclinación, Un chorro de agua que emerge de una manguera, describen conocidas trayectorias del mismo tipo: la parábola. Imaginemos un velocímetro fijo a la piedra, por ejemplo, de manera que su vector velocidad pueda trazarse en todo instante. El resultado será parecido a la representación de la figura 13. La dirección de la fuerza que obra sobre la piedra es la misma que la del cambio de velocidad y ya hemos visto cómo se puede determinar. La siguiente figura 14, da los cambios de velocidad de nuestro ejemplo, indicando que la fuerza es vertical y dirigida hacia abajo. Es exactamente igual a la fuerza que actúa si la piedra cae directamente desde cierta altura. Las trayectorias son completamente diferentes, como también lo son las velocidades, pero el cambio de velocidad tiene la misma dirección, esto es, hacia el centro de la Tierra.

Fig. 14



Una piedra atada al extremo de una cuerda, que se hace girar en un plano horizontal, describe una trayectoria circular.

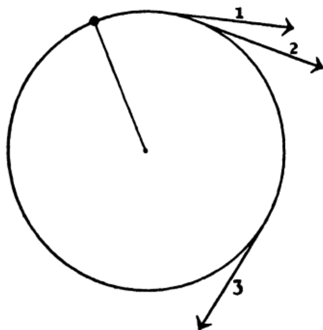


Fig. 15

Todos los vectores del diagrama de este movimiento tienen la misma longitud, si el movimiento es uniforme (fig. 15). Sin embargo, la velocidad no es la misma en todos los puntos, pues la trayectoria no es rectilínea. Sólo en

el movimiento rectilíneo y uniforme no actúan fuerzas. En el movimiento circular uniforme actúan fuerzas que cambian la dirección de la velocidad, aun cuando no su magnitud. De acuerdo con la ley del movimiento debe haber una fuerza que cause este cambio; una fuerza, en este caso, entre la piedra y la mano que sostiene la cuerda. Aquí se presenta el siguiente interrogante: ¿en qué dirección actúa dicha fuerza? Un diagrama vectorial nos da la respuesta. Tracemos, como en la figura 16, los vectores velocidad correspondientes a dos puntos muy próximos, para hallar el cambio de velocidad. Este último vector, dibujado en línea de puntos, resulta dirigido paralelamente a la cuerda y hacia el centro del círculo, o sea perpendicular al vector velocidad que coincide la tangente. En otras palabras, la mano ejerce una fuerza sobre la piedra, por intermedio de la cuerda.

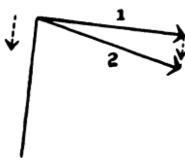


Fig. 16

El movimiento de la Luna alrededor de la Tierra constituye u ejemplo importante de ese movimiento, pues es muy aproximadamente circular y uniforme. La fuerza está dirigida hacia la Tierra por la misma razón que en el ejemplo anterior de la piedra resultaba dirigida hacia la mano. Pero en este caso no existe un vínculo material entre la Tierra y la Luna, aunque se puede imaginar una línea que una los centros de ambos cuerpos: la fuerza actúa esta línea y está dirigida hacia el centro de la Tierra, análogamente a la que produce la caída de una piedra.

Todo lo que se ha expuesto hasta aquí respecto al movimiento se puede resumir en una sola frase: *La fuerza y el cambio de velocidad son vectores que tienen una misma dirección y sentido*. Es la clave inicial del problema del movimiento, pero no es suficiente para la explicación de todos los movimientos observados. El tránsito del pensamiento aristotélico al de Galileo constituye un paso importantísimo en la fundación de la ciencia; a partir de este acontecimiento, la línea de su desarrollo fue clara y firme. Estamos exponiendo los trabajos de los pioneros de la ciencia, que consisten descubrir nuevos e inesperados caminos de progreso: las aventuras del pensamiento científico que crea una imagen eternamente cambiante del Universo. Los pasos iniciales y fundamentales son siempre revolucionarios. La imaginación

científica encuentra demasiados estrechos los conceptos antiguos y los reemplaza por otros nuevos. Entre dos crisis, la ciencia continúa un desarrollo evolutivo. Para entender las razones y las dificultades que obligan a una modificación importante de los conceptos usuales, se deben conocer no las claves iniciales sino también las conclusiones que de ellas se pueden deducir.

Una de las características más importantes de la física moderna reside en el hecho de que las conclusiones deducidas de las claves iniciales son cualitativas y también cuantitativas. Consideremos, de nuevo la caída de una piedra. Hemos visto que su velocidad aumenta medida que va cayendo. Pero, ¿cuál es la magnitud de este aumento? ¿Cuál es la posición y la velocidad de la piedra en un instante cualquiera de su caída? El investigador desea poder predecir los sucesos y determinar experimentalmente si la observación confirma sus predicciones y, en consecuencia, las suposiciones iniciales.

Para alcanzar conclusiones cuantitativas nos vemos obligados a recurrir al lenguaje de las matemáticas. La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente simples y pueden, por regla general, exponerse en lenguaje accesible a todo el mundo. Para desentrañar y desarrollar estas ideas se requiere el conocimiento de una refinadísima técnica de investigación. Las matemáticas, como instrumento de razonar, son indispensables si queremos obtener resultados que puedan compararse con los resultados de la experiencia. Mientras nos ocupemos únicamente de las ideas físicas fundamentales, podremos evitar el empleo de las matemáticas. Como en estas páginas hacemos esto sistemáticamente, nos vemos obligados de vez en cuando a citar, sin demostración, ciertos resultados necesarios para comprender claves importantes que aparecen en el desarrollo ulterior de la física. El precio que hay que pagar por abandonar el lenguaje matemático consiste en una pérdida de precisión y en la necesidad de mencionar a veces resultados sin indicar cómo se obtuvieron.

Un caso importantísimo de movimiento es el de la Tierra alrededor del Sol. Es sabido que su trayectoria es una curva cerrada llamada elipse. (Ver fig. 17.) Construido el diagrama vectorial del cambio de velocidad de la Tierra, se ve que la fuerza que obra sobre nuestro planeta está dirigida permanentemente hacia el Sol. Pero esto, después de todo, es una información precaria. Desearíamos poder predecir la posición de la Tierra y los demás planetas en un instante arbitrario, la fecha y la duración del próximo eclipse solar, y multitud de otros sucesos astronómicos. Es perfectamente posible cumplir con este deseo natural del espíritu humano, pero no basándonos en la clave inicial únicamente, pues en este caso tenemos saber, además de la dirección

y el sentido de la fuerza, su valor, o sea, su magnitud. Se debe a Newton la inspirada conjetura, la u genial, que resolvió este problema. De acuerdo con su ley de gravitación, la fuerza de atracción entre dos cuerpos depende de manera simple de la distancia que los separa. Se hace menor do su separación aumenta. En concreto: resulta 2 × 2 = 4 veces menor, si la distancia se duplica; 3 × 3 = 9 veces menor si ésta se triplica, etc.

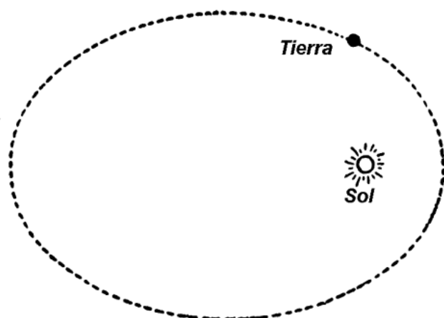


Fig. 17

Acabamos de ver que, en el caso de la fuerza de gravitación, ha conseguido expresar, de una manera simple, su dependencia d la distancia entre los cuerpos en cuestión. Se procede en forma similar en los otros casos, por ejemplo en las fuerzas eléctricas, magnéticas, etc., tratando de encontrar una expresión simple de las mismas. Tal expresión se justifica únicamente cuando las conclusiones que de ella se derivan son confirmadas por la experiencia.

El conocimiento de esa dependencia no es suficiente para descripción del movimiento de los planetas. Hemos visto que los vectores que representan la fuerza y el cambio de velocidad producido en un intervalo pequeño de tiempo tienen una misma dirección, pero debemos admitir, con Newton, que existe entre sus longitudes una relación sencilla. Consideremos un cuerpo y los cambios de velocidad sufridos por el mismo en intervalos iguales de tiempo entonces, según Newton, dichos cambios son proporcionales a las respectivas fuerzas. Con referencia al movimiento de los planetas, son necesarias dos leyes complementarias. Una es de carácter general establece la relación entre la fuerza y el cambio de velocidad. La otra, de carácter especial, se refiere a la dependencia exacta de la fuerza respecto de la distancia entre los cuerpos. La primera es la ley general del movimiento, de Newton, y la segunda su ley de gravitación. Juntas determinan el movimiento. Esto resulta claro mediante el siguiente razonamiento:

Supongamos que en un instante dado se pueda determinar la posición y la velocidad de un planeta conociéndose, además, la fuerza que sobre él actúa. Entonces, de acuerdo con la ley de Newton, se puede obtener el cambio de velocidad durante un corto intervalo de tiempo. Teniendo la velocidad inicial y su cambio, podemos encontrar la velocidad y posición planeta al final de dicho intervalo de tiempo. Por reiteración sucesiva de este proceso, se puede hallar toda la trayectoria del movimiento sin recurrir a datos u observaciones ulteriores. Éste es, en principio el método que sigue la mecánica para predecir el curso de un cuerpo en movimiento; pero, como acaba de exponerse, es difícilmente practicable. En la práctica, tal procedimiento sería extremadamente fatigoso e impreciso. Afortunadamente, resulta innecesario utilizarlo, pues empleando las matemáticas se consigue una descripción concisa del movimiento con menos tinta que la que se gasta en una sola frase. Las conclusiones así derivadas pueden ser probadas o refutadas por medio de la observación.

El movimiento de caída de una piedra en el aire y el de revolución de la Luna en su órbita, se deben a una misma clase de fuerza exterior, a saber: la atracción que la Tierra ejerce sobre los cuerpos materia les. Newton descubrió que dichos movimientos y el de los planetas son manifestaciones muy especiales de una fuerza de gravitación universal, que actúa entre dos cuerpos cualesquiera. En los casos sencillos, el movimiento puede describirse y predecirse con ayuda de las matemáticas. En aquellos, complicados, que involucran la acción recíproca de varios cuerpos, la descripción matemática no es sencilla, pero los principios fundamentales son los mismos.

En resumen, las conclusiones a que llegamos siguiendo nuestras claves iniciales resultan verificadas en el movimiento de la caída de los cuerpos, en el movimiento de la Luna, la Tierra y los planetas.

En realidad, es todo nuestro sistema de suposiciones el que ha de ser confirmado o destruido, en conjunto, por la experiencia. Ninguna de las hipótesis puede aislarse para verificarla separadamente. Se ha encontrado que, en el caso de los planetas, el sistema de la mecánica se cumple espléndidamente. Sin embargo, se puede perfectamente imaginar que otro sistema basado en suposiciones distintas se cumpla igualmente.

Los conceptos físicos son creaciones libres del espíritu humano y no están, por más que lo parezca, determinado unívocamente por el mundo exterior. En nuestro empeño de concebir la realidad, nos parecemos a alguien que tratara de descubrir el mecanismo invisible de un reloj, del cual ve el movimiento de las agujas, oye el tic-tac, pero no le es posible abrir la caja que lo

contiene. Si se trata de una persona ingeniosa e inteligente, podrá imaginar un mecanismo que sea capaz de producir todos los efectos observados; pero nunca estará segura de si su imagen es la única que los pueda explicar. Jamás podrá compararla con el mecanismo real, y no puede Concebir, siquiera, el significado de una tal comparación. Como él, el hombre de ciencia creerá ciertamente que, al aumentar su conocimiento, su imagen de la realidad se hará más simple y explicare mayor número de impresiones sensoriales. Puede creer en la existencia de un límite ideal del saber, al que tiende el entendimiento humano, y llamar a este límite la verdad objetiva.

UNA CLAVE QUE PASÓ INADVERTIDA

Al estudiar la mecánica, recibimos al principio la impresión de que, en esta rama de la ciencia, todo es simple, fundamental y definitivo. Difícilmente se sospecharía la existencia de un detalle importante, que nadie notó durante más de tres siglos. Este detalle olvidado está relacionado con uno de los conceptos fundamentales de la mecánica, la *masa.*

Retornemos al sencillo experimento ideal del carro sobre un camino perfectamente llano. Si estando inicialmente en reposo le damos un impulso, se pone en movimiento, con el que continúa uniformemente y en línea recta. Supongamos que la acción de la fuerza pueda repetirse todas las veces que deseemos sobre el mismo cuerpo y con la misma intensidad. La velocidad final, adquirida mediante estos impulsos iguales, es en todos ellos la misma. Pero, ¿sucede si el carro está a veces cargado y otras no? Adquirirá, evidentemente, menos velocidad cuando tiene carga que cuando no tiene. En consecuencia: si una misma fuerza actúa sobre dos cuerpos distintos que parten del reposo, sus velocidades resultantes no serán iguales. Esto se expresa diciendo que la velocidad depende la masa del cuerpo, y es menor cuando mayor es la masa.

De acuerdo con esto, poseemos un método, por lo menos en teoría, para determinar la masa o, más exactamente, para hallar relación entre las masas de distintos cuerpos. En efecto, si sobre masas en reposo actúan dos fuerzas idénticas y la velocidad final una resulta triple que la de la otra, concluimos que la primera una masa tres veces menor que la segunda. Esta no es, evidentemente, una manera práctica de obtener dicha relación, lo cual quita que podamos imaginar realizado éste u otro procedimiento basado en el principio de inercia, para su determinación.

¿Cómo se determina la masa en la práctica? No, naturalmente de la manera descrita, sino por medio de la balanza: pesando.

Vamos a discutir más detalladamente las dos maneras de hallar la masa.

El primer método no tiene relación alguna con la gravedad, o sea con la atracción de la Tierra. Después del empuje, el vehículo se mueve uniformemente si está sobre un plano perfectamente liso y horizontal. La fuerza de la gravedad que hace que el cuerpo esté sobre dicho plano, no varía y no juega ningún papel en la determinación de la masa. La cosa cambia cuando lo efectuamos por pesadas. No se podría usar jamás una balanza si la Tierra no ejerciera una atracción sobre los cuerpos, si la gravedad no existiera. La diferencia entre los dos métodos de hallar la masa está, pues, en que en el primero la fuerza de gravedad no interviene en absoluto, mientras que el segundo se basa esencialmente en su existencia.

Nos preguntamos ahora: ¿si se determina la relación de dos masas siguiendo los dos caminos esbozados arriba, obtendremos un mismo resultado? La respuesta que da la experiencia es rotunda: ¡el valor obtenido en ambos casos es exactamente el mismo! Esto no podía preverse; se basa en la observación y no en el raciocinio. Llamemos, para simplificar, masa inerte la una y masa gravitatoria la otra, según el procedimiento por el cual se la determine. Hemos visto que son iguales, pero es fácilmente imaginable que podría no haber sido así. Aquí se presenta, lógicamente, esta otra pregunta: ¿la cantidad entre ambas clases de masa será puramente accidental o tendrá una significación más profunda? La respuesta, desde el punto de vista de la física clásica, es: la igualdad entre ambas masas es realmente accidental, no debiendo adjudicársele una trascendencia ulterior. La respuesta de la física moderna es diametralmente opuesta: dicha identidad constituye una clave nueva y fundamental para la comprensión más profunda de la naturaleza. Esta fue, en efecto, una de las claves más importantes a partir de las que se desarrolló la teoría general de la relatividad.

Una novela de misterio que explique los sucesos extraños como accidentes parecería defectuosa. Es, ciertamente, más satisfactorio un relato que siga una trama racional. De igual manera, una teoría que ofrece una explicación de la identidad entre las masas de gravitación y de inercia es superior a otra que la interpreta como algo accidental; con tal de que, naturalmente, ambas teorías sean igualmente Compatibles con los fenómenos observados.

Como dicha identidad constituye un hecho fundamental para la formulación de la teoría de la relatividad, está justificado que la examinemos algo

más detenidamente. ¿Qué experimentos prueban convincentemente la igualdad de las dos masas? La respuesta está en el antiguo experimento de Galileo, consistente en dejar caer desde una torre distintas masas. Notó entonces que el tiempo requerido para la caída era siempre el mismo; que el movimiento de un cuerpo no depende de su masa. Para relacionar este resultado experimental, simple pero muy importante, con la identidad de las dos masas, debemos seguir un razonamiento algo intrincado.

Un cuerpo en reposo, bajo la acción de una fuerza exterior, se pone en movimiento y alcanza cierta velocidad; cede más o menos fácilmente según su masa inerte, resistiendo el cambio más tenazmente cuanto mayor sea su masa, e inversamente. Sin pretensión de rigor, se puede decir: la prontitud con que un cuerpo responde a la llamada de una fuerza exterior depende de su masa. Si fuera cierto que la Tierra atrae a todos los cuerpos con fuerzas iguales, los de masa inercial mayor caerían más lentamente. Pero esto no es cierto, ya que sabemos, con Galileo, que todos los cuerpos caen de la misma manera. Esto significa que la fuerza de atracción que la Tierra ejerce sobre cuerpos distintos debe ser diferente. Ahora bien, la Tierra atrae a una piedra, por ejemplo, con la fuerza de la gravedad, ignorando su masa de inercia. El "llamado" de la fuerza de gravitación de la Tierra depende de la masa gravitatoria. El movimiento "respuesta" de la piedra depende de su masa inerte. Como el movimiento "respuesta" es siempre uno mismo, según vimos, sé que la masa gravitatoria debe ser igual a la masa inerte.

Un físico formula la misma conclusión (con un poco de pedantería), diciendo: «La aceleración[1] de la caída aumenta proporcionalmente a la masa gravitatoria y disminuye en proporción a la masa inerte. Como todos los cuerpos caen con la misma aceleración constante, las dos masas deben ser iguales.»

En nuestra gran novela de misterio no existen problemas total y definitivamente resueltos. Al cabo de tres siglos tuvimos que volver al problema inicial del movimiento y revisar el procedimiento de investigación, descubrir detalles que pasaron inadvertidos, adquiriendo así una nueva imagen del Universo que nos rodea.

---

[1] Aceleración es el cambio de velocidad en la unidad de tiempo. (N. del T.)

¿ES EL CALOR UNA SUSTANCIA?

Aquí empezamos a seguir una nueva pista que se origina en el dominio de los fenómenos térmicos. Es en realidad imposible dividir la ciencia en ramas separadas y sin relación entre sí. En efecto, pronto veremos que los conceptos nuevos introducidos en este capítulo están entrelazados con los ya conocidos y con otros que aparecerán más adelante. Un método desarrollado en una rama de la ciencia puede muy a menudo aplicarse para la descripción de sucesos de naturaleza, en apariencia, totalmente distinta. En este último proceso, los conceptos originales sufren modificaciones que los hacen más apropiados para explicar los fenómenos que les dieron origen, además de interpretar los nuevos hechos, a los que por analogía o generalización se están aplicando.

Los conceptos más fundamentales en la descripción de los fenómenos relativos al calor son el de *temperatura* y el de *calor*. Transcurrió un tiempo increíblemente largo de la historia de la ciencia para que éstos fueran diferenciados entre sí; pero, una vez hecha la distinción, el resultado fue un rápido progreso. Aunque estos conceptos son ahora familiares a todo el mundo, los examinaremos de cerca, haciendo resaltar sus diferencias.

El sentido del tacto nos permite distinguir, sin duda alguna, entre un cuerpo caliente y otro frío. Pero esto constituye un criterio puramente cualitativo, y a veces hasta ambiguo e insuficiente, para una descripción cuantitativa. Esto se prueba por una experiencia bien conocida: busquemos tres recipientes que contengan agua caliente, tibia y fría respectivamente. Si se introduce una mano en el primer recipiente y la otra en el tercero, se recibirán las dos impresiones de frío y calor correspondientes. Si se retiran de dichos recipientes y se introducen inmediatamente en el agua tibia, se obtendrán dos sensaciones contradictorias, una de cada mano. Por la misma razón, si se encuentran en Nueva York en un día primaveral un esquimal y un nativo de algún país ecuatorial, tendrán opiniones discrepantes respecto del clima. Todas estas dificultades se vencen por medio del termómetro, ideado, en su forma primitiva, ¡por Galileo! El empleo del termómetro se basa en ciertas suposiciones evidentes. Las recordaremos citando algunas líneas de las lecciones de Black dadas hace unos ciento cincuenta años, quien contribuyo grandemente a dilucidar las dificultades relacionadas con los conceptos: calor y temperatura:

«Con el uso de este instrumento hemos aprendido que, si se toman mil, o más, diferentes clases de materia, como metales, piedras, sales, maderas, plumas, lana, agua y una variedad de otros fluidos, aunque estén todos inicialmente a diferentes calores, colocados juntos en una misma habitación sin fuego y donde no entre el sol, el calor pasará del más caliente de los cuerpos al más frío, en el transcurso de unas horas o tal vez de un día, al final del cual, si se les aplica sucesivamente un termómetro, indicará en todos ellos exactamente el mismo grado.»

La palabra *calores* debiera, de acuerdo con la nomenclatura actual, reemplazarse por la de *temperaturas*.

Un médico que observa el termómetro que acaba de retirar de la boca de un enfermo podría razonar así: «El termómetro marca su propia temperatura por la altura de la columna de mercurio; luego ésta aumenta proporcionalmente al incremento de la temperatura como el termómetro ha estado por algunos minutos en contacto con mi paciente, ambos estarán a una misma temperatura, y, en consecuencia, la temperatura del paciente es la que marca el termómetro.» Aun cuando el médico no piense en ello en ese preciso instante, está aplicando los principios físicos.

¿Pero contiene el termómetro la misma cantidad de calor el cuerpo del enfermo? No, naturalmente. Suponer que dos cuerpos tienen iguales cantidades de calor por el hecho de tener la misma temperatura sería, como observó Black:

«…adoptar una posición muy apresurada. Sería confundir la cantidad de calor de varios cuerpos con su concentración o intensidad respectiva, aunque es claro que se trata de dos cosas diferentes que deben distinguirse una de otra en los problemas de la distribución del calor.»

Esta distinción resulta evidente de los siguientes hechos: Un de agua, colocado sobre una fuente de calor, requiere cierto tiempo para entrar en ebullición. Para hacer hervir sobre la misma llama y en el mismo recipiente, por ejemplo, 12 litros de agua, se requerirá un tiempo mucho mayor. Se interpreta esto como una indicación de que en el último caso se transmite al líquido mayor cantidad de “algo” y se llama *calor* a este “algo”.

Del experimento siguiente se adquiere el importante concepto de *calor específico*: Si se calientan de una misma manera, en sendos recipientes, un kilogramo de agua y uno de mercurio, se encuentra que éste lo hace más rá-

pidamente; es decir, que necesita menos "calor" para aumentar su temperatura en un grado. Esto es general: para cambiar la temperatura, por ejemplo, de 15 a 16 grados, de masas iguales de distintas sustancias, como agua, mercurio, hierro, cobre, madera, se requieren cantidades diferentes de calor. Se expresa este hecho diciendo que cada sustancia posee una *capacidad calorífica* propia o un *calor específico* que la caracteriza.

Habiendo adquirido ya el concepto de calor analicemos su naturaleza más detenidamente. Busquemos dos cuerpos, uno caliente y el otro frío, o, más precisamente, el primero de temperatura más elevada que el segundo; si los ponemos en contacto y los suponemos enteramente aislados de toda influencia exterior, sabemos que, a la larga, sus temperaturas se igualarán. Pero, ¿cómo tiene lugar este proceso?

¿Qué sucede desde el momento en que se ponen en contacto hasta aquel en que equilibran su temperatura? Nos viene a la mente de inmediato la imagen del calor que "fluye" de un cuerpo al otro, por semejanza con el paso del agua de un nivel superior a otro inferior. Esta imagen, por primitiva que sea, parece concordar con muchos hechos, y puede establecerse la analogía siguiente:

Cantidad de agua — Cantidad de calor
Nivel superior — Temperatura más elevada
Nivel inferior — Temperatura más baja.

El flujo continúa hasta que en ambos niveles, es decir, ambas temperaturas, se igualan. Esta concepción, ingenua si se quiere, es de gran utilidad en las consideraciones cuantitativas. En efecto, si se mezclan ciertas cantidades de agua y alcohol, cuyas masas, temperaturas iniciales y calores específicos se conocen, se puede calcular, de acuerdo con el punto de vista adoptado, la temperatura final de la mezcla. Inversamente la determinación de la temperatura final nos permite, empleando procedimientos de álgebra, hallar la relación de los calores específicos de dos cuerpos.

El concepto de calor introducido aquí resulta similar a otros conceptos físicos. El calor es, de acuerdo con nuestro punto de vista, una especie de sustancia que juega un papel análogo al de la materia en la mecánica. Su cantidad puede cambiar o no, como el dinero: ahorrándolo o gastándolo. El capital guardado en una caja fuerte se conservará sin variación mientras permanezca cerrada; se conservarán las cantidades de masa y de calor en Un cuerpo aislado. Un "termo" ideal haría el papel de una caja fuerte. Y así como la

masa de un sistema aislado permanece invariable, aun Cuando tenga lugar una transformación química, así se conserva 1 el calor a pesar de pasar de uno a otro cuerpo. Incluso cuando el calor no se usa para elevar la temperatura de un cuerpo sino para fundir el hielo o vaporizar el agua, es posible considerarlo como una sustancia al recuperarlo enteramente, congelando el agua o condensando el vapor. Los antiguos nombres de calores latentes de fusión y de vaporización, indican que se originaron considerando calor como una sustancia. El calor latente está temporalmente escondido, como dinero guardado en una caja, pero utilizable si conoce la combinación de la cerradura.

El calor no es, ciertamente, una sustancia en el mismo sentido que la masa. Esta puede determinarse por medio de la balanza ¿Sucederá lo mismo con el calor? ¿Pesará más un trozo de hierro caliente que frío? La experiencia muestra que no. Si acaso él es una sustancia, tiene que ser imponderable. La "sustancia calor", llamada comúnmente calórico, constituye nuestro primer ejemplo de toda una familia de sustancias sin peso. Más adelante tendremos la oportunidad de seguir la historia de dicha familia, su auge y caída. Bástenos aquí notar el nacimiento de uno de sus miembros.

El objeto de toda teoría física es la explicación del más amplio conjunto de fenómenos posible. Se justifica mientras nos hace inteligibles sucesos de la naturaleza. Acabamos de ver que la teoría c calórico interpreta muchos fenómenos del calor. Pronto saltará a vista que se trata de una clave o pista falsa; que el calor no puede considerarse como una sustancia, ni siquiera imponderable. Esto resulta claro analizando ciertos hechos y experimentos sencillos que señalaron el principio de la civilización.

Consideramos como carácter esencial de una sustancia el que no se pueda crear ni aniquilar. Sin embargo, el hombre primitivo creó, por frotamiento, calor suficiente para encender la madera. Los casos de calentamiento por fricción son tan numerosos y familiares que nos eximen de pretender enumerarlos. En todos estos ejemplos se crea cierta cantidad de calor, hecho difícil de interpretar por la teoría del calórico. Es verdad que un partidario de esta teoría podría inventar argumentos a su favor. Su razonamiento sería parecido siguiente: «La teoría que considera el calor como una sustancia puede explicar la aparente creación de calor. Tómese el sencillo ejemplo de dos trozos de madera frotados entre sí. Ahora bien: él ha de influir y modificar las propiedades de la madera. Es perfectamente admisible que el cambio sea tal, que, permaneciendo invariable la cantidad de calor, se eleve la temperatura del cuerpo frotado. Después de todo, lo único que observamos es el aumento de

temperatura. Es probable que la fricción haga variar el calor específico de la madera y no la cantidad total de calor.»

A esta altura de la argumentación sería inútil la discusión con quien apoye la teoría del calórico, pues se trata de un asunto que únicamente el experimento puede resolver. Imaginemos dos piezas de madera idénticas y supongamos que ambas sufren aumentos iguales de temperatura por métodos diversos: en un caso por fricción, y en otro por contacto, pongamos por caso, con un radiador. Si las dos piezas tienen el mismo calor específico a la nueva temperatura, toda la teoría del calórico cae por tierra. Hay algunos métodos muy sencillos para determinar calores específicos y la suerte de esta teoría depende del resultado de tales medidas. Pruebas capaces de pronunciar un veredicto de vida o muerte de una teoría se dan frecuentemente en la física y son llamadas experimentos *cruciales*.

El carácter crucial de un experimento se revela en la forma en que plantea el problema, la cual permite explicarlo mediante una sola de las teorías puestas a prueba. La determinación de los calores específicos de dos cuerpos de una misma naturaleza, que se encuentran a temperaturas iguales obtenidas por frotamiento en uno y por el flujo de calor en otro, es un experimento crucial típico, que fue realizado hace unos ciento cincuenta años por Rumford, dando, como resultado, un golpe mortal a la teoría del calórico.

Veamos lo que dice al respecto el propio Rumford en uno de sus informes:

«En los hechos y sucesos de la vida diaria se presentan muchas oportunidades para contemplar los fenómenos más curiosos de la naturaleza, y a menudo se pueden efectuar los más interesantes experimentos filosóficos, casi sin molestias ni gastos, por medio de la maquinaria ideada para servir a las necesidades puramente mecánicas de las artes o de las manufacturas.

»He tenido frecuente ocasión de observarlo, y estoy convencido de que el hábito de mantener los ojos abiertos para todo lo que acontezca en la labor diaria ha conducido, ya por accidente, ya por excursiones agradables de la imaginación, excitada con la observación de sucesos comunes, a dudas útiles y a excelentes esquemas de investigación y progreso, más a menudo que todas aquellas intensas meditaciones filosóficas de las horas expresamente dedicadas al estudio...

»Estando encargado, últimamente, de dirigir la perforación de los cañones en los talleres del arsenal militar de Munich, me quedé sorprendido ante el enorme grado de calor que adquiere dicha arma de bronce en corto tiempo, al ser horadada y ante el calor aún más intenso (mucho mayor que e del agua

hirviendo como comprobé experimentalmente) de las virutas metálicas separadas por el barreno...

»¿De dónde viene el calor, producido de hecho en la operación mecánica arriba mencionada?

»¿Acaso lo suministran las virutas metálicas que desprende el barreno de la masa del metal?

»Si éste fuera el caso, de acuerdo con las doctrinas modernas del calor latente y del calórico, su capacidad calorífica no sólo debe cambiar, sino que la variación debe ser grande, lo bastante para explicar todo el calor producido.

»Pero no hay tal cambio. En efecto, tomando cantidades iguales peso, de esas virutas y de delgadas tiras, del mismo bloque de metal, cortadas por una fina sierra, e introduciéndolas a la misma temperatura (la del agua hirviendo) y en cantidades iguales, en agua fría (esto es, a la temperatura de 59,5ºF), encontré que la porción de agua en que se pusieron las virutas no se calentó más ni menos que la otra con las tiras de metal.»

Y llega a la conclusión:

«Y al analizar el asunto, no debemos olvidar la circunstancia más notable: que la fuente de calor generada por fricción aparece, en estos experimentos, como inagotable.

»Apenas resulta necesario agregar que todo aquello que un cuerpo o sistema de cuerpos aislados es capaz de ir suministrando sin limitación, no puede, de manera alguna, ser una sustancia material, y me parece extremadamente difícil, si no imposible, imaginar algo capaz de producirse y comunicarse como el calor en estos experimentos, a no ser MOVIMIENTO.»

He aquí planteada la bancarrota de la teoría antigua; o, para ser más exactos, podemos decir que la teoría del calórico queda limitada a los problemas del flujo del calor de un cuerpo a otro. Otra vez, como ha sugerido Rumford, tenemos que buscar una nueva clave. Para ello, dejemos por el momento el problema del calor y volvamos a la mecánica.

LA MONTAÑA RUSA

Consideremos la atracción popular de la montaña rusa. Se levanta un pequeño tren hasta el punto más alto de una vía. Al deja lo libre, empieza a rodar, por la acción de la fuerza de la gravedad primero hacia abajo, y sigue

después subiendo y bajando por un fantástico camino curvo, lo cual produce en los viajeros la emoción debida a los cambios bruscos de velocidad. Toda "montaña rusa" tiene su punto más elevado en el lugar donde se inicia el viaje y no alcanza nunca, en todo su recorrido, otra altura igual. Una descripción completa del movimiento sería muy complicada. Por una parte tenemos el problema mecánico de los cambios de posición y velocidad en función del tiempo; por otra parte, la cuestión del frotamiento y por ende la creación de calor en los rieles y las ruedas. La única razón válida para dividir aquel proceso físico en estos dos aspectos está en que así se hace posible el uso de conceptos ya discutidos. La separación conduce a una idealización de nuestro caso, pues un proceso físico en que aparezca exclusivamente el aspecto mecánico se puede sólo imaginar, pero nunca realizar.

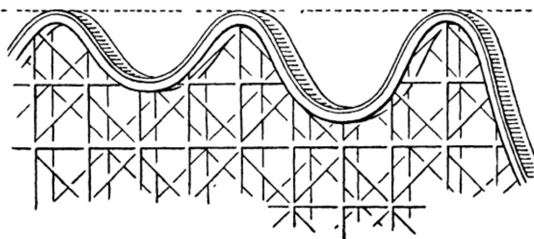


Fig. 18

Con relación al experimento ideal, imaginemos que alguien descubriera un procedimiento capaz de eliminar el roce que acompaña siempre al movimiento y se decidiera a aplicar su invento a la construcción de una "montaña rusa", debiendo arreglárselas solo para encontrar la manera de construirla. El vehículo ha de descender y ascender repetidas ve ces; su punto de partida estará a 35 metros de altura, por ejemplo. Al final de varias tentativas, descubriría la sencilla regla siguiente: puede darle a la trayectoria la forma que le plazca (como la de la fig. 18), con tal de que la elevación no exceda la de la posición inicial. Si el vehículo debe efectuar todo el recorrido libremente, entonces la altura de la montaña puede alcanzar los 35 metros todas las veces que quiera, pero nunca excederla. La altura primera no puede recuperarse jamás si el vehículo marcha sobre rieles verdaderos, a causa de la fricción, pero nuestro hipotético Ingeniero no necesita preocuparse por ella.

Sigamos el movimiento del tren ideal sobre la vía ideal desde instante en que comienza a descender desde el punto de partida. A medida que cae, su distancia al suelo disminuye, pero su velocidad aumenta. Esta frase pudiera recordarnos a primera vista aquella frase de una lección de idioma: "no tengo lápiz, pero usted tiene seis naranjas"... Sin embargo, no es tan falta de sentido.

No existe una relación entre el hecho de que yo no tenga lápiz y usted tenga seis naranjas; pero hay una relación muy real entre la distancia del vehículo al suelo y su velocidad. Se puede calcular ésta en un instante cualquiera si se conoce su altura sobre el suelo; cálculo que aquí omitimos debido a su carácter cuantitativo, óptimamente expresado por fórmulas matemáticas.

En el punto más elevado, el vehículo tiene una velocidad nula o cero y está a la distancia de 35 metros del suelo. En la posición más baja posible, su distancia al suelo es nula, siendo, en cambio, máxima su velocidad. Estos hechos pueden ser expresados en otros términos. En la posición más elevada, el vehículo tiene *energía potencial* pero no *energía cinética* o de movimiento. En el punto más bajo, posee la máxima energía cinética pero ninguna energía potencial. Toda posición intermedia, donde hay determinada velocidad elevación, tiene ambas energías. La energía potencial crece con elevación mientras la energía cinética aumenta con la velocidad.

Los principios de la mecánica son suficientes para explicar el movimiento. Se pueden introducir matemáticamente y con todo rigor los conceptos de energía potencial dependiente de la posición y energía cinética dependiente de la velocidad. La adopción de estos dos nombres es, naturalmente, arbitraria y se justifica por su conveniencia. La suma de las dos magnitudes permanece invariable constituye una constante del movimiento. La energía total, potencial más cinética, se comporta como una sustancia; como dinero cuyo valor queda intacto a pesar de múltiples cambios de un tipo a otro de moneda, por ejemplo, de dólares a pesetas y viceversa, de acuerdo con un tipo de cambio bien definido.

En una verdadera “montaña rusa” (v. fig. 19), donde la fricción impide al vehículo alcanzar nuevamente un nivel igual al de punto de partida, se verifica todavía un cambio continuo entre las energías potencial y cinética; pero su suma ya no permanece constante, sino que va disminuyendo. Ahora debemos dar otro paso importante para relacionar los aspectos mecánicos y térmicos del movimiento. La riqueza de consecuencias y de generalizaciones que resultan de este paso se verá más adelante.

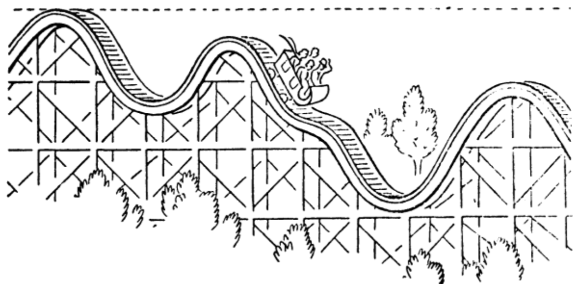


Fig. 19

En efecto, además de las energías cinética y potencial involucradas en el movimiento, nos encontramos también con el calor creado por el rozamiento. ¿Corresponderá también este calor a la disminución de la energía mecánica, es decir, cinética y potencial? Es inminente aquí una nueva conjetura. Si el calor puede considerarse como una forma de energía, podría ser que la suma del calor, la energía cinética y la potencial, permaneciera constante. No sólo el calor, sino que éste y otras formas de energía tomadas en conjunto se comportan como una sustancia, resultando indestructible su suma. Es como si una persona debiera pagarse a sí misma una comisión en francos por cambiar dólares en pesetas, guardando el dinero de la comisión, de modo que la suma de los dólares, pesetas y trancos conserva su valor según un cierto tipo de cambio.

El progreso ha destruido el antiguo concepto del calor como sustancia, pero tratamos de crear una nueva sustancia, la energía, Con el calor como una de sus formas.

LA EQUIVALENCIA

Hace menos de un siglo, la nueva pista, que condujo a considerar el calor como una forma de la energía, fue barruntada por Mayer y confirmada experimentalmente por Joule. Constituye una extraña coincidencia el hecho de que casi toda la labor fundamental sobre la naturaleza del calor la realizaran aficionados a la física para quienes era, puede decirse, su “hobby” favorito, y no por físicos profesionales. Entre los más eminentes se cuentan: el escocés Black, tan polifacético en sus actividades, el médico alemán Mayer y gran aventurero americano conde de Rumford, que vivió en Europa y, además de otras actividades, fue ministro de Guerra en Bavaria. También al cervecero

inglés Joule, quien, en sus ratos perdidos, efectuó algunos de los experimentos relativos a la conservación de la energía.

Joule demostró mediante la experiencia la conjetura que considera al calor como una forma de la energía y determinó el tipo de cambio. Vale la pena ver cuáles fueron sus resultados.

La energía cinética más la potencial de un sistema constituye en conjunto su *energía mecánica*. En el caso de la "montaña rusa" hemos supuesto que parte de esta energía se convierte en calor. Si ello es cierto, tendrá que haber aquí y en todos los procesos físicos similares una relación o *equivalencia* entre ambas. Esta es una cuestión rigurosamente cuantitativa, pero el hecho de que una cantidad dada de energía mecánica se pueda transformar en determinada cantidad de calor, es de por sí de trascendental importancia. Nos gustaría conocer el valor numérico del equivalente, o sea, cuanto calor se obtiene de una determinada cantidad de energía mecánica.

Joule dedicó sus investigaciones a la determinación de este valor. El dispositivo de uno de sus experimentos es muy semejante al mecanismo de un reloj de pesas. Dar cuerda a tal reloj consiste elevar dos pesas, agregando así energía potencial al sistema. Si después de esta operación no se toca el reloj, puede considerarse como un sistema aislado. Las pesas caen lentamente y el reloj marcha. Después de cierto tiempo, las pesas habrán alcanzado su posición más baja y el reloj se parará. ¿Qué ha pasado con la energía? La energía potencial de las pesas se convirtió gradualmente energía cinética del mecanismo y ésta se disipó paulatinamente en forma de calor.

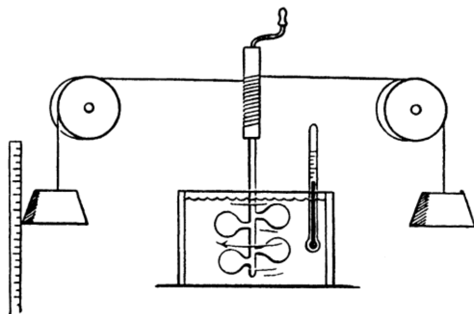


Fig. 20

Una variación ingeniosa de dicho dispositivo le permitió a Joule medir esta pérdida de calor, y, de ahí, el equivalente mecánico del calor. En su aparato (fig. 20) dos pesas producían la rotación de una rueda de paletas sumergida en agua. La energía potencial de las pesas se transformara en energía

cinética de las partes móviles y luego en calor que elevaba la temperatura del agua. Joule midió este aumento de temperatura, y, de acuerdo con el valor conocido de su calor específico, calculó la cantidad de calor absorbido.

Resumió los resultados de muchos ensayos como sigue:

«1.º La cantidad de calor producida por fricción de los cuerpos, sólidos o líquidos, es siempre proporcional a la cantidad de fuerza (por fuerza entiende Joule a la energía) gastada. Y

»2.° La cantidad de calor capaz de elevar la temperatura de una libra de agua (pesada en el vacío, a una temperatura entre 55 y 60ºF) en un grado del termómetro Fahrenheit requiere el gasto de una fuerza (energía) mecánica representada por la caída de 772 libras desde una altura de un pie.»[2]

En otras palabras, la energía potencial de 772 libras, al elevarse un pie sobre el suelo, es equivalente al calor necesario para elevar la temperatura de una libra de agua de 55ºF a 56ºF». Experimentos posteriores dieron una precisión mayor; pero el equivalente mecánico del calor es esencialmente lo que Joule descubrió en su primer trabajo.

Una vez realizado este importante trabajo, el progreso ulterior fue rápido. Se reconoció que el calor y la energía mecánica sor dos de las múltiples formas que la energía puede tomar. La radiación emitida por el Sol es energía, pues parte de ella se transforma en calor sobre la Tierra. Una corriente eléctrica posee energía, pues puede calentar un alambre o hacer girar las ruedas de un motor. El carbón representa energía química que se libera, como calor, quemarlo. En todo suceso natural se transforma cierta energía en otra, siempre con una equivalencia bien definida. En un sistema cerrado, aislado de toda influencia exterior, se conserva la energía comportándose entonces como una sustancia. La suma de todas las formas posibles de la energía en tal sistema es una constante, cuando varíen las cantidades de cualquiera de esas formas. Se considera todo el Universo como un sistema cerrado, y se enuncia pomposamente por los físicos del siglo XIX que la energía del Universo es invariable, que no puede ser destruida ni creada.

Nuestros dos conceptos de sustancia son, pues, *materia* y *energía*. Ambos obedecen a leyes de conservación: un sistema aislado no puede variar su masa

[2] En las Unidades que se usan en nuestro país, basadas en el sistema métrico decimal, el equivalente del calor es igual a 427 kilográmetros por kilocaloría; es decir, que el calor necesario para elevar la temperatura de kilo de agua de 15ºC a 16ºC equivale a la energía potencial de 427 kilogramos que se encuentran a la altura de un metro sobre el suelo. (N. del T.)

ni su energía. La materia es ponderable, la energía no. Por eso tenemos dos conceptos distintos y dos principio de conservación. ¿Hay que tomar literalmente, aún ahora, e ideas? ¿O ha cambiado esta imagen, aparentemente bien fundada, la luz del conocimiento moderno? ¡Sí! Nuevos cambios en ambos, conceptos están relacionados con la teoría de la relatividad. Volveremos sobre este tema después.

EL FONDO FILOSÓFICO

Los resultados de las investigaciones científicas comportan menudo cambios profundos en la concepción filosófica de problemas cuya amplitud escapa al dominio restringido de la ciencia ¿Cuál es el objeto de la ciencia? ¿Qué requisitos debe cumplir teoría que pretenda describir la naturaleza? Estas cuestiones, cuando exceden los límites de la física, están íntimamente relacionadas con ella, ya que tienen su origen en la ciencia. Las generalizaciones filosóficas deben basarse sobre las conclusiones científicas. Pero, establecidas y aceptadas aquéllas ampliamente, influyen a su vez en el desarrollo ulterior del pensamiento científico, indicando uno de los múltiples caminos a seguir. Una rebelión afortunada contra lo aceptado da como consecuencia, generalmente, inesperados progresos que traen aparejadas nuevas concepciones filosóficas. Estas observaciones parecerán vagas e insustanciales mientras no estén ilustradas por ejemplos de la historia de la física.

A continuación trataremos de describir las primeras ideas filosóficas sobre el objeto de la ciencia. Estas ideas influyeron grandemente en el desarrollo de la física hasta hace apenas unos cien años, cuando fueron descartadas a causa de nuevos hechos y teorías, que a su vez formaron una nueva base para la ciencia.

En toda la historia de la ciencia, desde los filósofos griegos hasta la física moderna, ha habido tentativas para explicar la complejidad de los fenómenos naturales partiendo de cierto número de ideas y de relaciones simples y fundamentales. Este es el principio básico de toda la filosofía natural. Ya está expresado en la labor de los atomistas griegos. Hace veintitrés siglos escribió Demócrito:

»Por convención, dulce es dulce; por convención, amargo es amargo, y por convención, caliente es caliente, frío es frío, color es color. Pero en realidad sólo hay átomos y vacío. Es decir, los objetos de la sensación se suponen

reales y es costumbre considerarlos como tales, pero en verdad no lo son. ¡Sólo los átomos y el vacío son reales!»

Esta idea quedó en la filosofía antigua nada más que como una ficción ingeniosa de la imaginación. Los griegos no conocían ley alguna que relacionara hechos subsiguientes. La relación científica entre teoría y experimento tuvo en realidad su principio en los trabajos de Galileo. Ya hemos visto y desarrollado las claves iniciales que condujeron al descubrimiento de las leyes del movimiento. Durante dos siglos de investigación científica la fuerza y la materia fueron los conceptos subyacentes a todas las tentativas de comprender la naturaleza Es imposible imaginar la una sin la otra, pues cada parte de la materia manifiesta su existencia como agente de unas fuerzas que actúan sobre otras partes de la materia.

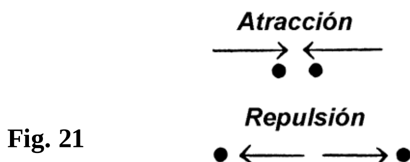


Fig. 21

Consideremos el caso más simple de dos partículas materiales entre las cuales actúan fuerzas. Las fuerzas más simples que se pueden Imaginar son las de atracción y repulsión. En ambos casos, los vectores que las representan están sobre la línea de unión de las partículas (v. fig. 21). La exigencia de simplicidad conduce, pues, a la imagen de partículas que se atraen o repelen; toda suposición diferente respecto a la dirección en que obran las fuerzas daría una imagen mucho más complicada. ¿Se puede hacer una conjetura igualmente sencilla sobre la longitud de los vectores fuerza?

Incluso deseando evitar hipótesis demasiado especiales, es posible la siguiente: La fuerza que actúa entre dos partículas cualquieras depende únicamente de la distancia que las separa, como con las fuerzas de gravitación. Esto parece suficientemente simple. Se podría imaginar fuerzas más complicadas, tales que, por ejemplo, dependan de las velocidades de las partículas además de la distancia. Repitiendo: con materia y fuerza como conceptos fundamentales, resulta muy difícil imaginar suposiciones más simples que de fuerzas actuantes según la recta de unión de las partículas y dependientes, únicamente, de su separación. Pero, ¿será posible describir todos los fenómenos físicos por medio de dichas fuerzas solamente? El gran éxito de la mecánica en todas sus ramas, su resonante triunfo en el desarrollo de la astronomía,

la aplicación de ideas a problemas aparentemente distintos y de carácter no-mecánico, todo esto contribuyó a afianzar la creencia de que es posible describir todos los fenómenos de la naturaleza en términos de simples fuerzas actuando entre objetos inalterables. Durante los dos siglos posteriores a Galileo, tal intento, consciente o inconsciente, es visible en casi toda creación científica. Esto fue claramente formulado por Helmholtz a mediados del siglo XIX:

«En resumen, el problema de las ciencias naturales consiste en referir todos los fenómenos de la naturaleza a las fuerzas de atracción y repulsión invariables cuyas intensidades dependan totalmente de la distancia. La posibilidad de resolver este problema constituye la condición de una comprensibilidad completa de la naturaleza.»

Por lo tanto, la línea de desarrollo de la ciencia está, según Helmholtz, perfecta y estrictamente determinada:

«Y su función habrá terminado —continúa Helmholtz— tan pronto como se cumpla la reducción de todos los fenómenos naturales a esas simples fuerzas y se demuestre que ésta es la única reducción posible.»

Esta concepción parece torpe e ingenua a un físico del siglo XX. Le asustaría pensar que la gran aventura de la investigación pudiera quedar terminada tan pronto y le parecería poco estimulante que quedara establecida para siempre una imagen infalible del Universo.

Aun admitiendo que según esos principios se pudiera reducir la descripción de todos los hechos naturales a la actuación de fuerzas simples entre las partículas, queda abierta la cuestión de la forma en que dichas acciones dependerían de la distancia. No se puede rechazar la posibilidad de que, para fenómenos distintos, esa dependencia sea diferente. En tal caso, la necesidad de introducir tipos distintos de fuerza sería ciertamente insatisfactoria desde dicho punto de vista filosófico. Sin embargo, el así llamado punto de vista mecanicista o concepción mecanicista del Universo, formulado con máxima claridad por Helmholtz, jugó un papel importantísimo en su tiempo. El desarrollo de la teoría cinética de la materia constituye una de las más grandes adquisiciones de la ciencia, directamente influida por la concepción mecanicista.

Antes de asistir a su ocaso, aceptemos provisionalmente el punto de vista de los físicos del siglo pasado y veamos qué conclusiones es posible obtener de su imagen del mundo exterior.

LA TEORÍA CINÉTICA DE LA MATERIA

¿Será posible explicar los fenómenos calóricos en función del movimiento de partículas cuyas interacciones responden a fuerzas simples? Supongamos que cierta masa de gas, aire por ejemplo, esté contenida en un recipiente cerrado a una temperatura determinada. Al calentarlo elevamos su temperatura aumentando, en consecuencia, su energía. Pero ¿cómo estará relacionado el calor con el movimiento? La posibilidad de tal conexión nos es sugerida por la concepción filosófica que acabamos de aceptar a título de ensayo y teniendo en cuenta que el calor puede ser engendrado por el movimiento El calor tiene que ser energía mecánica si todo problema es de naturaleza mecánica. El objeto de la *teoría cinética* es interpretar la materia precisamente de este modo. De acuerdo con ella, un gas es un agregado de un enorme número de partículas o moléculas, moviéndose en todas direcciones, chocando entre sí y cambiando dirección en cada colisión. Así como en una gran comunidad humana existe una edad o una riqueza medía, así debe existir entre las moléculas una velocidad media. Habrá, pues, una energía cinética media por partícula. Aumentar la cantidad de calor en el recipiente significa el aumento de la energía cinética media. Luego, de acuerdo con esta concepción, el calor no es una forma especial de la energía distinta de la mecánica, sino, precisamente, la energía cinética movimiento molecular. A una temperatura dada corresponde u energía cinética media por molécula bien definida. Esta no es, verdad, una suposición arbitraria. Si queremos idear una imagen de la materia coherente con el punto de vista mecánico, estamos obligados a considerar la energía cinética molecular como una medida de la temperatura.

Esta teoría es algo más que un juego de la imaginación. Se puede demostrar que la teoría cinética de los gases no sólo está acuerdo con la experiencia, sino que conduce efectivamente al entendimiento más profundo de los hechos observados. Ilustremos lo con algunos ejemplos.

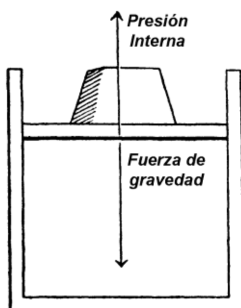


Fig. 22

Imaginemos un recipiente cerrado por un pistón que se puede desplazar libremente. Contiene cierta cantidad de gas que se mantiene a temperatura constante. Si el pistón está inicialmente en reposo en cierta posición, se elevará si disminuimos su peso, y descenderá si lo aumentamos. Es decir, para hacer bajar el pistón se ejercer una cierta fuerza contra la presión interna del gas. ¿En qué consiste el mecanismo de esta presión interna según la teoría cinética? Un número enorme de las partículas que constituyen el gas se mueven en todas direcciones y bombardean las paredes del recipiente y el pistón, rebotando como pelotas en una pared rígida. Este bombardeo continuo sostiene el pistón a una cierta altura, oponiéndose a la fuerza de gravedad que actúa hacia abajo sobre el pistón las pesas. En un sentido tenemos, pues, la fuerza de la gravedad en el opuesto muchos golpecitos irregulares de las moléculas; si ha de haber equilibrio, el efecto resultante, sobre el pistón de y todas esas pequeñas e irregulares fuerzas de choque, tiene que ser igual la fuerza de la gravedad. (v. fig. 22.) Supongamos que el pistón sea desplazado hacia abajo, comprimiendo el gas a una fracción de su volumen primitivo; a la mitad, pongamos por caso, manteniéndose constante su temperatura ¿Qué sucederá, de acuerdo con la teoría cinética? La fuerza procedente del bombardeo molecular ¿será más o menos intensa que antes de la compresión? Aunque la energía cinética media de las partículas no ha variado (temperatura constante), ha aumentado la frecuencia de sus colisiones con el pistón a causa de la reducción de volumen, y en consecuencia, la fuerza resultante debe haber aumentado. De acuerdo con esta imagen, derivada de la teoría cinética, resulta obvio que para mantener el pistón en una posición inferior se requiera un peso mayor y recíprocamente. Este sencillo hecho experimental es bien

conocido, pero su predicción es una consecuencia lógica de la teoría cinética de la materia.

Tomemos ahora dos recipientes que contengan volúmenes iguales de gases diferentes, por ejemplo, hidrógeno y oxígeno, a una misma temperatura. Supongamos que estos recipientes estén cerrados por pistones idénticos, sobre los cuales haya pesas iguales. Esto significa que ambos gases tienen volumen, temperatura y presión iguales. Si la temperatura es la misma, también lo será, según la teoría, la energía cinética media por partícula. Como la presión es igual, ambos pistones son bombardeados con una fuerza resultante igual. En término medio, cada molécula posee la misma energía y ambos recipientes tienen igual volumen. Luego, *el número de moléculas tiene que ser el mismo*, aun cuando los gases sean químicamente distintos. Este resultado es muy importante para la comprensión de muchos fenómenos químicos. Expresa que el número de moléculas contenidas en un volumen dado, a cierta temperatura y Presión, es independiente de la naturaleza del gas. Y es asombroso que la teoría cinética no sólo predice este número universal, sino que permite determinarlo. Sobre este punto volveremos pronto.

La teoría cinética de la materia explica, tanto cuantitativa como cualitativamente, las leyes de los gases descubiertas experimentalmente. Además, la teoría no está restringida a los gases, aunque sus mayores triunfos se dieran en este dominio.

Un gas puede licuarse por un descenso de su temperatura. Bajarla significa una disminución de la energía cinética media de sus moléculas. Resulta claro, por eso, que la energía media de una partícula de líquido es menor que la correspondiente a una partícula de gas.

El descubrimiento del movimiento browniano fue la primera manifestación del movimiento de las partículas suspendidas en un líquido; este fenómeno, en sí notable y llamativo, hubiera permanecido completamente misterioso e incomprensible si no fuera por la teoría cinética. Lo observó por primera vez el botánico Brown y fue explicado ochenta años después, a principios de este siglo. El único instrumento necesario para observar el *movimiento browniano* es un microscopio, que ni siquiera hace falta que sea particularmente bueno.

Brown trabajaba con granos de polen de ciertas plantas, esto es,

«Partículas o granos de un tamaño que varía entre un cuarto y un quinto de milésima de pulgada.»

Brown continúa, más adelante:

«Mientras examinaba la forma de esas partículas en el agua, observé que muchas de ellas estaban evidentemente en movimiento... Después de observaciones repetidas frecuentemente, me convencí de que estos movimientos no procedían de corrientes en el líquido ni de su evaporación gradual, sino que eran algo propio de las mismas partículas.»

Lo que Brown vio es la agitación incesante de los gránulos suspendidos en el agua, que el microscopio hace visible. ¡Espectáculo admirable! ¿Será esencial, para el fenómeno, el empleo de gránulos de determinadas plantas? Brown contestó a esta pregunta repitiendo el experimento con muchas plantas diferentes y encontró que todos los gránulos, si son suficientemente pequeños, tienen tal movimiento cuando están suspendidos en el agua. Además, halló el mismo movimiento permanente e irregular, tanto en partículas inorgánicas como en las orgánicas muy pequeñas. ¡Hasta con un fragmento pulverizado de esfinge observó el mismo fenómeno!

¿Cómo se explicará este fenómeno? Parece contradecir toda experiencia anterior. Examinando cada treinta segundos, por ejemplo, la posición de una partícula suspendida se obtiene la forma fantástica de su trayectoria. Lo pasmoso del fenómeno es el carácter, al parecer eterno, del movimiento. Un péndulo oscilante en el agua llega al reposo muy rápidamente si no obra sobre él una fuerza exterior. La existencia de un movimiento incesante parece contraria a toda experiencia. La teoría cinética de la materia logró vencer brillantemente esta dificultad.

Ni con el más potente de los microscopios se pueden ver las moléculas y sus movimientos tal como los describe la teoría cinética. Se debe admitir en conclusión, que si la teoría que considera el agua como un agregado de partículas es correcta, el tamaño de estas partículas debe estar por debajo del límite de visibilidad de los mejores microscopios. Aceptemos, sin embargo, la teoría y supongamos que represente una imagen consistente de la realidad. En este caso se explica el movimiento browniano de la siguiente manera: las partículas, visibles a través del microscopio, son bombardeadas por las mucho más pequeñas que componen el agua. El movimiento browniano se produce si los gránulos bombardeados son por otra parte suficientemente pequeños y se da porque la intensidad de este bombardeo no es la misma en todas direcciones y no puede ser promediado a causa de su carácter irregular y fortuito. El movimiento observado es, pues, el resultado de otro inobservable. El

comportamiento de las partículas grandes refleja, en cierto sentido, el de las moléculas, constituyendo, por así decirlo, una amplificación tan grande que permite su observación con el microscopio. La naturaleza casual e irregular de las trayectorias de los gránulos de Brown refleja irregularidades similares en las trayectorias de las moléculas que constituyen la materia. Se entiende, por eso, que un estudio cuantitativo del movimiento browniano nos puede proporcionar un conocimiento más profundo de la teoría cinética. Es evidente que el movimiento browniano, visible, depende del tamaño de las invisibles moléculas bombardeantes. Este movimiento no tendría existencia si las moléculas no poseyeran cierta energía, o en otras palabras, si no tuvieran masa y velocidad. Que el estudio del movimiento browniano pueda conducir a la determinación de la masa de las moléculas no es, por lo tanto, tan sorprendente.

La teoría cinética pudo formularse cuantitativamente después de laboriosas investigaciones teóricas y experimentales. La pista que se descubrió en el movimiento browniano fue una de las que proporcionaron datos cuantitativos. Los mismos resultados pueden obtenerse por diferentes caminos, que arrancan de claves completamente distintas. El hecho de que todos estos métodos confirmen el mismo punto de vista es muy importante, porque demuestra la coherencia interna de la teoría cinética de la materia.

Sólo citaremos aquí uno de los múltiples resultados cuantitativos alcanzados por la teoría y el experimento. Es muy probable que nos preguntemos: ¿Cuántas partículas contiene un gramo de hidrógeno? La respuesta corresponderá no sólo al hidrógeno sino también a todos los gases, pues ya sabemos que bajo ciertas condiciones dos gases tienen el mismo número de moléculas.

La teoría nos permite responder a la pregunta basándonos en ciertas medidas del movimiento browniano de un gránulo suspendido. La respuesta es un número inmensamente grande: ¡un tres seguido de veintitrés ceros! El número de moléculas en un gramo de hidrógeno es:

300.000.000.000.000.000.000.000

Imaginemos las moléculas de un gramo de hidrógeno tan aumentadas que se hagan visibles al microscopio; por ejemplo, que su diámetro sea una décima, o sea del tamaño de una partícula browniana. Entonces, ¡para empaquetarlas tendríamos que usar un cubo de, aproximadamente, medio kilómetro de lado!

Se puede calcular fácilmente la masa de una de las moléculas de hidrógeno dividiendo 1 por el número dado arriba. El resultado es el siguiente valor, fantásticamente minúsculo:

0,000 000 000 000 000 000 000 003 3 gramos

Las investigaciones sobre el movimiento browniano son solamente algunos de los múltiples experimentos que conducen a la determinación de este número, que desempeña un papel tan preponderante en la física.

En la teoría cinética de la materia y en todas sus importantes adquisiciones, se ve la realización del programa filosófico general, a saber: reducir la explicación de todos los fenómenos de la naturaleza a la interacción de partículas materiales.

RESUMEN

De acuerdo con la mecánica, es posible predecir la trayectoria futura de un cuerpo en movimiento y revelar su pasado, si se conoce su estado presente y las fuerzas que obran sobre él. Así, por ejemplo, se pueden prever las trayectorias futuras de todos los planetas. Las fuerzas actuantes son las de la gravitación de Newton, que sólo dependen de la distancia. Los admirables resultados de la mecánica clásica sugieren la conjetura de que la concepción mecanicista puede aplicarse de modo coherente a todas las ramas de la física, que todos los fenómenos pueden explicarse por la acción de fuerzas de atracción o repulsión, que dependen únicamente de la distancia y actúan entre partículas inmutables.

En la teoría cinética de la materia vemos cómo, partiendo de los problemas mecánicos, este punto de vista abarca los fenómenos térmicos y cómo conduce a una imagen satisfactoria de la estructura de la materia.

Lámina 1

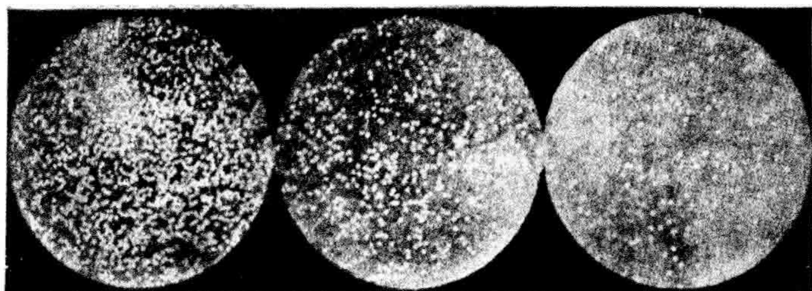


Fig. 23a. Partículas brownianas vistas a través del microscopio.



Fig. 23b. Una partícula browniana fotografiada con larga exposición y cubriendo una superficie.

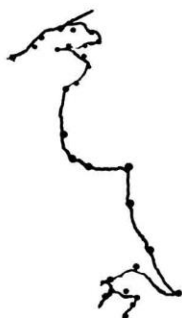


Fig.24. Posiciones consecutivas de una partícula browniana.

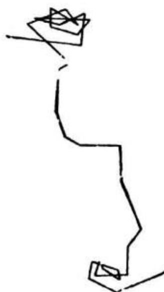


Fig. 25. Camino promedio de estas posiciones consecutivas.

2. EL OCASO DE LA CONCEPCIÓN MECANICISTA DE LA FÍSICA

LOS DOS FLUIDOS ELÉCTRICOS

Las páginas siguientes contienen una relación sucinta de algunos experimentos muy simples. Su exposición va a resultar un poco fatigosa, no sólo porque la descripción de los experimentos carece de interés, comparada con su realización, sino también porque su sentido no se hace patente hasta que una teoría lo explica. Nuestro propósito es ofrecer aquí un ejemplo ilustrativo del papel que hace la teoría en la física.

1.º Una barra de metal se apoya sobre un soporte de vidrio; cada uno de sus extremos está conectado, por medio de un conductor, con un electroscopio. ¿Qué es un electroscopio? Es un aparato sencillo que consiste, esencialmente, en dos hojuelas de oro, pendientes del extremo inferior de un vástago de metal, cuyo extremo termina en una pequeña esfera. El extremo con las hojuelas de oro está encerrado en una botella o recipiente de vidrio; el metal está en contacto únicamente con cuerpos no metálicos, llamados aisladores. Además del electroscopio y la barra metálica, nos proveemos de una barra de caucho y un pedazo de franela.

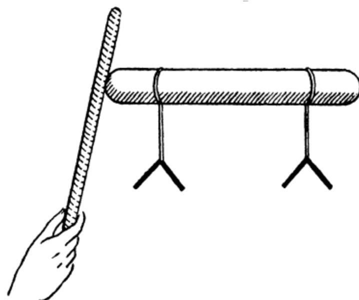


Fig. 26

El experimento se realiza de la siguiente manera: hay que comprobar, ante todo, si las hojas del electroscopio penden una al lado de la otra, ya que ésta es su posición natural. Si por casualidad no lo estuvieran, es suficiente tocar

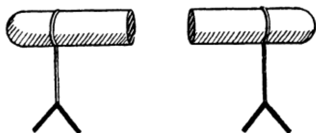
la esfera metálica exterior del electroscopio con un dedo, para que se junten. Efectuada esta operación preliminar, se frota vigorosamente la barra de caucho con la franela y se la pone en contacto con la barra metálica conectada con el electroscopio.

¡Las hojas de oro se separan en el acto! (Ver fig. 26.) Las hojuelas continuarán separadas aun después de retirado el caucho.

2.° Con el aparato anterior se puede efectuar el siguiente experimento, empezando, como antes, con las hojas de oro juntas. Esta vez, en lugar de poner la barra de caucho en contacto con la de metal, hay que limitarse a aproximarla convenientemente. ¡Nuevamente, las hojas se separan! Pero esta vez, si se retira la barra de caucho las hojas de electroscopio vuelven a su posición normal, en lugar de permanecer separadas.

3º Si se introduce una pequeña modificación en los anteriores aparatos, es posible efectuar un tercer experimento. Supongamos que la barra de metal se compone de dos partes unidas y separables. Frotando la barra de caucho con la franela y acercándola al metal, se repite el mismo fenómeno: las hojas se separan. Si en estas condiciones se divide la barra en sus dos partes, y, hecho esto, se retira la de caucho, las hojas permanecen separadas en lugar de volver a su posición primitiva (fig. 27).

Fig. 27



Es difícil, por cierto, despertar interés y entusiasmo por estos experimentos simples. En la Edad Media, su ejecutor habría sido probablemente condenado; a nosotros nos parecen triviales e ilógicos.

En verdad, limitándonos a leer una vez la exposición de esas experiencias, nos parece tarea fácil realizarlas en el orden y en las condiciones expuestas arriba, siendo más bien probable que nos aturrulláramos al tratar de llevarlas a cabo. Pero un poco de teoría las hace inteligibles. Podríamos decir más: es muy difícil imaginar la realización de tales experimentos, efectuados al azar, sin la preexistencia de ideas más o menos definidas con respecto a su significado.

Expondremos a continuación las ideas fundamentales de una teoría sencilla e ingenua, que explica todos los hechos descritos.

Según esta teoría —primera suposición, existen dos *fluidos eléctricos*: uno llamado *positivo* (+) y otro llamado *negativo* (–). Estos fluidos tienen

cierta semejanza con la materia en el sentido ya explicado, es decir, su cantidad puede aumentar o disminuir, pero en todo sistema aislado su total se conserva constante. Hay, sin embargo, una diferencia esencial entre este caso y los de calor, materia o energía: se admite la existencia de dos sustancias eléctricas. Resulta imposible usar aquí la analogía anterior del dinero, salvo que se generalice un poco. Un cuerpo es eléctricamente neutro cuando los fluidos eléctricos positivo y negativo se compensan mutuamente. Un hombre nada tiene, porque realmente nada posee, o porque su haber es exactamente igual a su debe. Se puede comparar, pues, el debe y el haber de su balance con las dos clases de fluidos eléctricos.

La segunda suposición de la teoría es la siguiente: fluidos eléctricos de una misma clase se repelen, mientras que fluidos de distinta Clase se atraen. Esto puede representarse gráficamente de la siguiente manera (fig. 28):

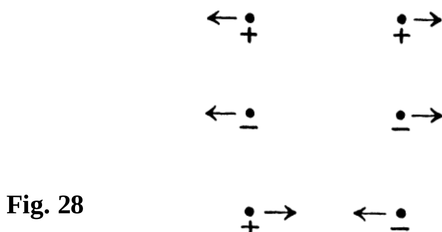


Fig. 28

Es necesario admitir aún otra suposición: existen dos clases de cuerpos: aquellos en los cuales los fluidos pueden moverse libremente, llamados *conductores*, y aquellos en los cuales los fluidos no se pueden desplazar, llamados *aisladores*. Como en casos análogos, esta división no debe aceptarse en forma estricta sino aproximada. El conductor o aislador ideal es una ficción que nunca puede realizarse. Los metales, la tierra, el cuerpo humano, son ejemplos de conductores, aunque no todos igualmente buenos. El vidrio, la goma, la porcelana, etc., son aisladores. El aire es sólo parcialmente aislador, como lo sabe todo aquel que ha visto realizar los experimentos descritos. Resulta siempre una buena excusa atribuir los malos resultados de los experimentos electrostáticos a la humedad, que aumenta la conductibilidad del aire.

Las suposiciones teóricas enunciadas son suficientes para explicar los tres experimentos descritos. Los expondremos otra vez, en el mismo orden, pero a la luz de la teoría de los fluidos eléctricos.

1.º La barra de caucho, como todos los cuerpos, en condiciones normales, es eléctricamente neutra. Contiene los dos fluidos, positivo y negativo, en

cantidades iguales. Al frotarla con la franela, se separan estos fluidos. Esta expresión es puramente convencional, ya que es la aplicación de los términos creados por la teoría y referidos al proceso de electrificación por frotamiento. La clase de electricidad que tiene en exceso la barra después de frotada se denomina negativa, nombre que es, ciertamente, convencional. Si se hubiera realizado el experimento frotando una barra de vidrio con piel de gato, habría que denominar positiva a la electricidad en exceso, para estar de acuerdo con la convención aceptada. Prosigamos:

Tocando el metal con el caucho frotado, se le suministra fluido eléctrico. En el metal, la electricidad se mueve libremente, difundiéndose por toda su extensión y alcanzando las hojas de oro. Como el efecto de la electricidad negativa sobre otra del mismo signo es de repulsión, las dos hojas tratan de separarse lo más posible y producen el efecto enunciado. El metal descansa sobre vidrio o algún otro aislador, y de ahí que el fluido permanezca en el conductor, en la medida que la conductibilidad del aire lo permita. Entendemos ahora por qué se debe tocar el metal antes de empezar el experimento. Con esta operación hacemos que el metal, el cuerpo humano y la tierra formen un vasto conductor, en el que se diluye el fluido eléctrico, no quedando prácticamente nada en el electroscopio.

2.° Este experimento comienza de la misma manera que el anterior, pero sólo acercamos el caucho al metal, en lugar de tocarlo. Como se ha supuesto que, en un conductor, dichos fluidos pueden moverse libremente, se separan, el uno atraído y el otro repelido por la electricidad de la barra de caucho. Cuando la barra de caucho se retira, se mezclan nuevamente, ya que los fluidos de signos opuestos se atraen, explicándose así los efectos observados.

3.° Dividiendo el metal en dos partes y retirando la barra de caucho frotada, los dos fluidos no pueden volver a mezclarse, por lo que las hojas de oro retienen un exceso de uno de los fluidos eléctricos y por ello permanecen separadas.

A la luz de esta sencilla teoría, parecen comprensibles todos los hechos mencionados hasta aquí. La misma teoría nos permite entender, además de éstos, muchos otros hechos del campo de la electrostática. El objeto de toda teoría es guiar hacia nuevos hechos, sugerir nuevos experimentos y conducir al descubrimiento de fenómenos nuevos. Un ejemplo hará esto más claro. Imaginemos un cambio en el experimento número 2. Supongamos que se conserva la barra de caucho cerca del metal y que al mismo tiempo se toca el conductor con un dedo (v. fig. 29). ¿Qué sucederá entonces? La teoría contesta: el fluido repelido (–) puede ahora escaparse a través de nuestro cuerpo,

por lo que resta sólo un fluido, el (+). Las hojas del electroscopio situadas del lado de la barra de caucho permanecerán separadas como se ve en la figura. El experimento confirma, en efecto, esta previsión.

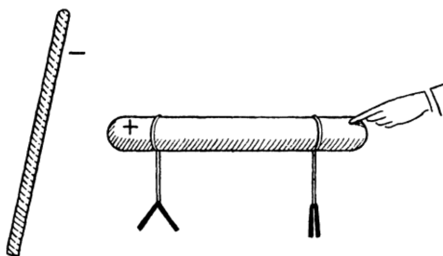


Fig. 29

La teoría que estamos tratando es, por cierto, ingenua e inadecuada desde el punto de vista de la física moderna. Sin embargo, es un buen ejemplo para mostrar los rasgos característicos de toda teoría física.

No hay teoría en la ciencia. Siempre se da el caso de que algunos de los hechos predichos teóricamente quedan contradichos por la experiencia. Cada teoría tiene su período de gradual desarrollo y triunfo, tras el cual puede experimentar un rápido declive. El ascenso y el declive de la teoría del calor considerado como una sustancia, que ha sido ya discutida, es uno de los posibles ejemplos.

Más adelante discutiremos otros de mayor profundidad e importancia. Por lo general, todo gran progreso en la ciencia debe su origen a la crisis de una teoría aceptada y al esfuerzo para hallar el camino que permita salir de ella. De ahí que nos veamos obligados a examinar las viejas ideas y las viejas teorías, aunque pertenezcan al pasado, porque ésta es la única manera de entender la importancia de las nuevas y la extensión de su validez.

En las primeras páginas de nuestro libro comparamos el papel de un investigador con el de un detective, quien, después de reunir los datos indispensables, encuentra la solución correcta mediante un proceso puramente mental. En cierto sentido esta comparación debe considerarse muy superficial. Tanto en la vida como en las novelas policíacas, el crimen existe. El detective tiene que buscar cartas, huellas dactilares, balas, armas, pero por lo menos sabe que se ha cometido un asesinato. Este no es el caso para un hombre de ciencia. No es difícil imaginar una persona que desconozca en absoluto la electricidad; los antiguos vivían, por ejemplo, bastante felices sin ningún conocimiento de ella. Démosle a esa persona metal, hojas de oro, botellas y recipientes de vidrio, una barra de caucho, franela, en una palabra, todo el

material requerido para la realización de los tres experimentos citados. Podrá ser una persona muy culta pero probablemente verterá vino en las botellas, usará la franela como paño de limpieza y nunca se le ocurrirá hacer los experimentos que hemos descrito. Para el detective, el crimen, repetimos, existe y planteado el problema: ¿quién mató a Pedro Pérez?... El hombre de ciencia, por lo menos en parte, comete su propio crimen, así como realiza la investigación. Más aún, su labor no es la de explicar un caso determinado, sino todos los fenómenos que han sucedido o que puedan suceder.

En la introducción del concepto de fluidos se ve la influencia de las ideas mecanicistas que tratan de explicarlo todo por la acción de fuerzas de naturaleza sencilla que actúan entre distintas sustancias.

Para comprobar si la interpretación mecanicista es aplicable a la descripción de los fenómenos eléctricos, debemos considerar el siguiente problema: supongamos estar en presencia de dos pequeñas esferas con cargas eléctricas, esto es, que posean ambas un exceso de uno de los fluidos eléctricos. Sabemos que las esferas se atraerán o repelerán. Pero, ¿depende la intensidad de estas fuerzas únicamente de la distancia? Y de ser así, ¿de qué modo?

Parece ser que la suposición más simple es que esta fuerza depende de la distancia, en la misma forma que la fuerza de gravitación, la cual disminuye, por ejemplo, a la novena parte de su valor primitivo, si la distancia se hace triple. Las experiencias realizadas por Coulomb demostraron que esta ley es realmente válida. Cien años después de descubrir Newton la ley de gravitación, encontró Coulomb una dependencia similar de la fuerza eléctrica respecto de la distancia. Las diferencias más notables entre la ley de Newton y la de Coulomb son: la atracción de la gravedad actúa siempre mientras que las fuerzas eléctricas se manifiestan únicamente en cuerpos cargados de electricidad. En el caso de la gravitación, la fuerza es solamente atractiva, mientras que las fuerzas eléctricas pueden producir atracciones y repulsiones.

Se plantea aquí la misma cuestión que consideramos al tratar el calor: ¿son o no los fluidos eléctricos sustancias imponderables? En otras palabras: ¿pesa lo mismo un trozo de metal en estado neutro que electrizado? Nuestras balanzas no acusan diferencia. Deducimos de esto que los fluidos eléctricos son también miembros de la familia de las sustancias imponderables.

El desarrollo ulterior de la teoría de la electricidad requiere la Introducción de dos conceptos nuevos. Evitaremos, otra vez, definiciones rigurosas y usaremos, en cambio, analogías con conceptos ya familiares. Recordemos cuán esencial resultó, para el entendimiento de los fenómenos producidos por

el calor, la distinción entre el calor mismo y la temperatura. No menos importancia tiene en el estudio de la electricidad la diferenciación de los conceptos de potencial eléctrico y carga eléctrica. Esta diferencia se pone de manifiesto por la siguiente analogía:

Carga eléctrica — Cantidad de calor
Potencial eléctrico — Temperatura

Dos conductores, por ejemplo, dos esferas de diferente tamaño, pueden tener la misma carga eléctrica, es decir, el mismo exceso de uno de los fluidos eléctricos, pero sus potenciales serán diferentes, siendo mayor el de la esfera menor. El fluido eléctrico tendrá mayor densidad y, por lo tanto, estará más comprimido en el conductor menor. Como las fuerzas repulsivas deben aumentar con la densidad, la tendencia de la carga a escapar del conductor será mayor en el caso de la esfera menor. Esta tendencia de la carga eléctrica a escapar de un conductor es una medida directa de su potencial. Con el objeto de mostrar claramente la diferencia entre carga y potencial, vamos a describir algunos casos de comportamientos de cuerpos y los correspondientes de conductores cargados.

Calor	**Electricidad**
Si dos cuerpos de distintas temperaturas se ponen en contacto, al cabo de cierto tiempo alcanzan igual temperatura.	Si dos conductores aislados, a distintos potenciales eléctricos, se ponen en contacto, rápidamente alcanzan un mismo potencial.
Una misma cantidad de calor dada a dos cuerpos de distinta capacidad calorífica produce en ellos distintos cambios de temperatura.	Iguales cantidades de cargas eléctricas en dos cuerpos de capacidades eléctricas distintas producen en ellos diferentes cambios de potencial.
Un termómetro en contacto con un cuerpo indica —mediante la altura de su columna de mercurio— su propia temperatura y, por lo tanto, la del cuerpo en cuestión.	Un electroscopio puesto en contacto con un conductor indica —mediante la separación de las hojas de oro— su propio potencial eléctrico y, por lo tanto, el potencial eléctrico del conductor en cuestión.

Pero esta analogía no debe extremarse. Un ejemplo mostrará sus diferencias y similitudes. Si se pone en contacto un cuerpo caliente con otro frío, fluye el calor del más caliente al más frío. Por otro lado, supongamos que

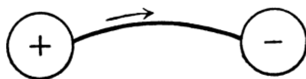
tenemos dos conductores aislados, poseedores de cargas iguales pero opuestas, una positiva y la otra negativa. Los dos están a diferente potencial. Por convención, consideremos el potencial correspondiente a la carga negativa como inferior el potencial correspondiente a la carga positiva.

Si estos dos conductores se ponen en contacto o se unen por intermedio de un alambre, de acuerdo con la teoría de los fluidos eléctricos, dichos cuerpos no manifestarán carga alguna y, por lo tanto, tampoco ninguna diferencia de potencial. Debemos imaginar un "flujo" de carga eléctrica de un conductor a otro en el corto tiempo durante el cual la diferencia de potencial desaparece. ¿Pero cómo desaparece? ¿Va, acaso, el flujo positivo hacia el cuerpo negativo, o a la inversa?

Con los datos que poseemos, hasta el presente, faltan elementos de juicio para decidir esta cuestión. Podemos aceptar cualquiera de las dos posibilidades o, también, la de que van en ambos sentidos.

Se trata únicamente de un asunto convencional, y la elección no tiene gran importancia, porque no poseemos ningún método para resolver el asunto experimentalmente. Estudios ulteriores, que han permitido el desarrollo de una teoría mucho más profunda de la electricidad, dieron una contestación a este problema, que casi no tiene sentido, cuando se lo formula en los términos de la teoría simple y primitiva de los fluidos eléctricos. Aquí adoptaremos, simplemente, el modo de expresión siguiente: el fluido eléctrico se desplaza del conductor de mayor potencial al de menor potencial. En el caso de nuestros dos conductores, la electricidad fluye del positivo hacia el negativo, como está esquematizado en la figura 30. Esta expresión es únicamente convencional y, hasta aquí, completamente arbitraria.

Fig. 30



Esta dificultad indica que la analogía entre calor y electricidad no es, en modo alguno, completa. Hemos visto la posibilidad de adaptar la concepción mecanicista a los fenómenos de la electrostática. Esto es también posible en el caso de los fenómenos magnéticos.

LOS FLUIDOS MAGNÉTICOS

Procederemos aquí en la misma forma que antes, exponiendo hechos muy simples y buscando, posteriormente, su explicación teórica.

1.º Supongamos dos largas barras magnéticas o imanes, una en nuestra mano y la otra suspendida libremente por su centro (fig. 31). Acerquemos los extremos de estos imanes de tal modo que se produzca una atracción entre ambos. Si esto no ocurriere con el extremo que se acerque primeramente, se producirá, sin duda, con el otro. Si las barras están imantadas, algo se observará, de cualquier manera.

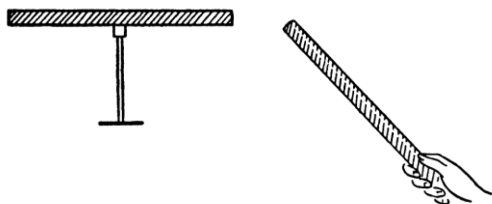


Fig. 31

Los extremos de los imanes se llaman *polos*. Continuando con la experiencia, desplacemos el polo del imán que tenemos en la mano, a lo largo del imán suspendido. La atracción disminuirá y desaparecerá totalmente cuando el polo que se desplaza alcance el punto medio de la barra magnética. Si se continúa moviendo el imán más allá del punto medio, empezará a manifestarse una fuerza de repulsión, que aumenta a medida que se aproxima al otro polo, hasta ser máxima en este punto.

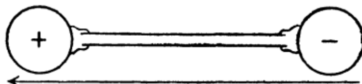
2.° El experimento anterior sugiere el siguiente: Cada imán tiene dos polos. ¿Podremos separarlos? La idea parece de fácil realización: dividámoslo exactamente por su centro. Ya hemos dicho que no se manifiesta acción alguna entre el polo de un imán y el punto medio del otro. El resultado de dividir en dos un imán es sorprendente e inesperado. Si se repite el experimento descrito en (1) con sólo la mitad del imán suspendido los resultados son exactamente iguales a los ya referidos. ¡Donde antes no existía la menor manifestación de fuerza magnética, tenemos ahora un fuerte polo!

¿Cómo se pueden explicar estos hechos? Podemos tratar de elaborar una teoría magnética, modelada sobre la teoría de los fluidos eléctricos, ya que en los fenómenos magnéticos como en los eléctricos hay atracción y repulsión.

Imaginemos dos conductores esféricos que posean cargas iguales, una positiva y otra negativa. Aquí, igual quiere decir un mismo valor absoluto; +5 y

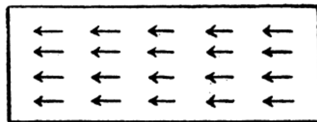
–5, por ejemplo, tienen el mismo valor absoluto. Supongamos que estas esferas están unidas por intermedio de una varilla de vidrio (v. fig. 32). Esquemáticamente, este dispositivo puede representarse por una flecha que se dirige del conductor cargado negativamente hacia el conductor positivo. Al conjunto lo denominamos un *dipolo eléctrico.*

Fig. 32



Es evidente que dos dipolos así se comportarán exactamente como las dos barras magnéticas del experimento (1). Si consideramos nuestro dispositivo como el modelo de un imán, podemos decir, suponiendo la existencia de fluidos magnéticos, que un imán no es otra cosa que un *dipolo magnético* que tiene en sus extremos fluidos de distintas clases, como en el caso de la electricidad. Esta teoría simple, copiada de la teoría de la electricidad, es adecuada para la explicación del primer experimento. Según ella, hay atracción en un extremo, repulsión en el otro, y equilibrio de fuerzas iguales y opuestas, en el centro. Pero, ¿qué nos dice con respecto al segundo experimento? Si dividimos la barra de vidrio del dipolo eléctrico, obtendremos dos polos aislados, lo mismo tendría que suceder con la barra de hierro del dipolo magnético, contrariando los resultados de la segunda experiencia. Esta contradicción nos fuerza a introducir una teoría más útil. En lugar del modelo anterior, imaginemos que un imán consiste en un gran número de dipolos magnéticos *elementales*, muy pequeños, que no pueden ser divididos en polos aislados. En el imán, estos dipolos magnéticos elementales actúan como si fueran uno solo, ya que todos están orientados de la misma manera (v. fig. 33). Así se explicaría por qué, dividiendo un imán, aparecen dos nuevos polos en sus nuevos extremos; esta teoría, algo más refinada, nos explica tanto los hechos del experimento (1) como los del (2); no obstante, en muchos casos, la teoría más simple da una explicación y el refinamiento parece innecesario. Citemos un ejemplo: sabemos que un imán atrae un trozo de hierro; ¿por qué? En un trozo de hierro común, los dos fluidos magnéticos están mezclados de tal manera que no es posible que se manifieste ningún efecto. Acercándole un polo positivo, actúa como dando a los fluidos una voz de orden: atrae el fluido negativo y repele el positivo. Entonces se produce la atracción entre el hierro y el imán. Si se retira el imán, los fluidos vuelven aproximadamente a su estado primitivo, dependiendo esto de hasta qué punto “recuerden” la voz de orden de la fuerza exterior.

Fig. 33



Poco queda por decir con relación al aspecto cuantitativo del problema. Con dos barras imantadas muy largas, podríamos investigar la atracción o repulsión de dos polos. El efecto que pudieran ejercer los otros dos extremos de las barras es despreciable, si éstas son suficientemente largas. ¿Qué relación hay entre la distancia a que se colocan los otros polos y la atracción o repulsión que ejercen? Coulomb comprobó que esta relación es la misma que en la ley de la gravitación de Newton y la de la ley de atracciones y repulsiones electrostáticas del propio Coulomb.

Comprobamos nuevamente, en esta teoría, la aplicación de un punto de vista general: la tendencia a explicar todos los fenómenos por medio de fuerzas atractivas y repulsivas que, actuando entre partículas inalterables, dependen únicamente de la distancia.

Debemos mencionar aquí un hecho bien conocido, del que haremos uso más adelante. La Tierra es un gran dipolo magnético. No existe ninguna explicación de este hecho. El Polo Norte es, aproximadamente, el polo magnético negativo (–) y el Polo Sur, el polo magnético positivo (+) de la Tierra. Los nombres positivo y negativo son convencionales; pero, una vez fijados, nos permiten, en un caso cualquiera, la designación de los distintos polos. Una aguja magnética apoyada sobre un eje vertical obedece a la voz de mando de la fuerza magnética de la Tierra, dirigiendo su polo (+) hacia el Polo Norte, esto es, hacia el polo magnético (–) de la Tierra.

A pesar de que el punto de vista mecanicista puede aplicarse con cierta consistencia en el dominio de los fenómenos eléctricos y magnéticos, no hay razón para quedarse satisfechos con ello. Algunos aspectos de la teoría son, ciertamente, deficientes. Ha sido necesario inventar nuevas clases de sustancias: dos fluidos eléctricos y los dipolos magnéticos elementales. ¡El número de las sustancias empieza a ser abrumador!

Las fuerzas son simples. Se expresan de una manera similar en los casos de la gravitación, de la electrostática y del magnetismo; pero el precio que pagamos por esta simplicidad es elevado: introducción de nuevas sustancias imponderables. Estas son, más bien, conceptos artificiales y sin relación alguna con las sustancias comunes, caracterizadas, fundamentalmente por su masa.

LA PRIMERA DIFICULTAD SERIA

Estamos ahora en condiciones de notar la primera dificultad grave en la aplicación de nuestra posición filosófica. Se demostrará más adelante cómo esta dificultad y otra, aún más seria, provocó un fracaso total de la creencia de que todos los fenómenos pueden ser explicados mecánicamente.

El desarrollo vertiginoso de la electricidad como rama de la ciencia y de la técnica comenzó con el descubrimiento de la corriente eléctrica. Con esto se da uno de los pocos casos de la historia de la ciencia en que la casualidad parece haber desempeñado un papel preponderante. La historia de la convulsión de la pata de una rana se cuenta de muchas maneras. Sin discutir la veracidad de los detalles, es indudable que el descubrimiento accidental de Galvani condujo a Volta —a fines del siglo XVIII— a construir lo que es conocido con el nombre de *pila eléctrica*. Esta pila no tiene ya uso práctico, pero sirve aún, como una fuente sencilla de corriente eléctrica, para las demostraciones escolares y, como ejemplo fácil, para las descripciones de los libros de texto.

El principio de su construcción es simple. Supongamos que tenemos varios vasos de vidrio, conteniendo cada uno una solución diluida de ácido sulfúrico en agua. Sumergidas en la solución, hay en cada vaso dos placas, una de cobre y otra de cinc. La placa de cobre de un vaso se une a la de cinc del siguiente, de manera tal que queden sin conectar la placa de cobre del primero y la de cinc del último. En estas condiciones —si el número de elementos, esto es, el número de recipientes que constituyen la batería, es suficiente— es posible detectar, mediante un electroscopio sensible, una diferencia del potencial entre la placa de cobre del primer vaso y la placa de cinc del último.

Hemos descrito lo que es una pila, únicamente con el propósito de indicar cómo se obtiene una diferencia de potencial, fácilmente medible, con los aparatos ya descritos.

Para lo que sigue servirá un solo elemento. El potencial del cobre es más alto que el del cinc. La expresión “más alto” la usamos en el mismo sentido según el cual se dice que +2 es mayor que –2. Si se une un conductor a la placa de cobre y otro a la placa de cinc, ambos se cargan, el primero con electricidad positiva y el segundo con electricidad negativa. Hasta ahora, nada de nuevo tenemos, y podemos intentar la aplicación de las ideas anteriores respecto a diferencias de potencial. Hemos visto que la diferencia de potencial entre dos conductores, unidos por medio de un alambre, se anula rápidamente porque hay un flujo eléctrico del uno al otro. Este proceso es

similar al de la nivelación de las temperaturas por el flujo del calor. ¿Es éste exactamente el caso de la pila voltaica? Volta escribió en su informe que las placas se comportan como conductores:

«débilmente cargados, que actúan incesantemente, o sea, que sus cargas se restablecen inmediatamente después de cada descarga; en una palabra, este hecho proporciona una carga ilimitada o crea una impulsión o acción perpetua del fluido eléctrico».

El resultado sorprendente de su experimento es, pues, que la diferencia de potencial entre las placas de cobre y cinc no se anula, como en el caso de dos conductores cargados y unidos por un alambre. La diferencia de potencial persiste y, de acuerdo con la teoría de los fluidos eléctricos, tiene que producir un flujo eléctrico constante del mayor potencial (placa de cobre) al menor (placa de cinc). Con el objeto de salvar la teoría de los fluidos, podemos suponer que hay algo que constantemente actúa en el sentido de regenerar la diferencia de potencial, provocando así el desplazamiento continuado del fluido eléctrico. Pero todo el fenómeno es asombroso desde el punto de vista de la energía. Una cantidad notable de calor se genera en el alambre que conduce la corriente eléctrica, y en algunos casos hasta es suficiente, si el alambre es fino, para fundirlo. Esto indica que se ha producido energía térmica en el alambre. La pila voltaica es en realidad un sistema aislado, ya que no se le suministra energía del exterior. Si queremos salvar el principio de la conservación de la energía, hay que determinar dónde se producen las transformaciones necesarias, y a expensas de qué se genera el calor. No es difícil darse cuenta de que en la pila se produce un proceso químico complicado, en el cual el cobre y el cinc sumergidos, así como la propia solución acidulada, toman parte activa. Desde el punto de vista de la energía, la serie de las transformaciones que se producen es la siguiente:

Energía química → energía eléctrica (o sea corriente) → calor.

Una pila voltaica tiene una duración limitada; los cambios químicos, asociados al flujo de la electricidad, la inutilizan después de cierto tiempo de uso.

El experimento que reveló realmente las graves dificultades con que tropieza la aplicación de las ideas mecanicistas resulta al principio sorprendente y hasta extraño. Lo realizó Oersted hacia 1820. Oersted escribe:

«De estos experimentos parece desprenderse que la aguja magnética se ha movido de su posición mediante la ayuda de un aparato galvánico, y esto sólo cuando el circuito galvánico estaba cerrado y no cuando estaba abierto, como ciertos físicos de renombre han intentado en vano hace varios años.»

Supongamos tener una batería voltaica y un alambre conductor. Si el alambre se conecta con la placa de cobre y no con la de cinc, tendremos como antes una diferencia de potencial, pero no una corriente eléctrica. Supongamos que el alambre se dobla en forma de círculo, en cuyo centro se coloca una aguja magnética, estando ambos, aguja y alambre, en un mismo plano. Nada sucede mientras el alambre no toca la placa de cinc. No hay ninguna fuerza. El potencial existente no tiene influencia alguna sobre la posición de la aguja. Es difícil comprender por qué los "físicos muy famosos", como Oersted los llama, esperaban encontrar algún tipo de influencia.

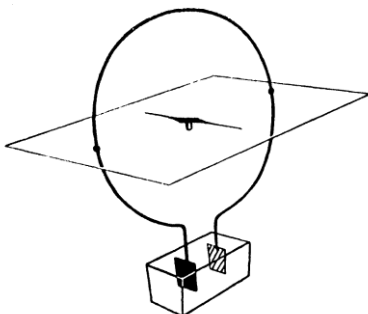


Fig. 34

Pero supongamos ahora que se conecta el alambre con la placa de cinc; inmediatamente se producirá una cosa extraña: la aguja magnética abandonará su posición y uno de sus polos apuntará hacia el lector, si la página de este libro representa el plano del circuito (fig. 34). El efecto se produce como si actuara sobre el polo magnético una fuerza *perpendicular* al plano del circuito. Es difícil, en virtud de tales hechos, evitar esta conclusión acerca de la dirección de la fuerza actuante.

Este experimento es de importancia, en primer lugar porque pone de manifiesto una relación entre fenómenos en apariencia totalmente distintos; el magnetismo y la corriente eléctrica. Hay otro aspecto aún más importante. La fuerza que se manifiesta entre el polo magnético y las porciones de alambre por el cual pasa la corriente no pueden estar sobre líneas que unan el alambre con la aguja o las partículas que constituyen el fluido eléctrico con los dipolos

magnéticos elementales. ¡La fuerza es perpendicular a estas líneas! Por primera vez aparece una fuerza completamente distinta de aquellas a las que, de acuerdo con nuestro punto de vista mecanicista, tratábamos de reducir las acciones del mundo exterior. Recordemos que la fuerza de gravitación, las fuerzas electrostáticas y magnéticas que obedecen a las leyes de Newton y Coulomb, actúan a lo largo de la línea que une los dos cuerpos que se atraen o repelen.

Esta dificultad aumentó más aún a consecuencia de una investigación realizada con gran maestría por Rowland hace unos cien años. Prescindiendo de detalles técnicos, este trabajo puede describirse del siguiente modo: imaginemos una pequeña esfera electrizada; imaginemos además que esta esfera se desplaza muy rápidamente a lo largo de una circunferencia en cuyo centro está colocada una aguja magnética (fig. 35). En principio, es el mismo experimento que el de Oersted, con la única diferencia de que en lugar de una corriente común tenemos aquí una carga eléctrica que hacemos mover mecánicamente. Rowland llegó a la conclusión de que el resultado es igual al obtenido cuando una corriente eléctrica pasa por un conductor circular. La aguja imantada gira por la acción de una fuerza perpendicular.

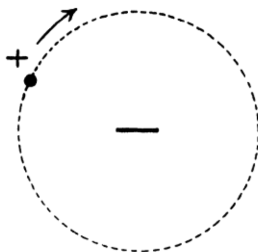


Fig. 35

Si el movimiento de la esfera cargada se acelera, la fuerza que se manifiesta sobre el polo magnético aumenta; la desviación de la aguja a partir de su posición inicial se hace mayor. Este resultado nos trae otra grave complicación. Además del hecho de que la fuerza no actúa según la línea de unión de la carga móvil y del polo magnético, su intensidad depende de la velocidad de la carga. Toda la interpretación mecánica se basa en la suposición de que todos los fenómenos pueden explicarse por la acción de fuerzas que dependen únicamente de la distancia y no de la velocidad. El resultado del experimento de Rowland viola ciertamente esta suposición. A pesar de ello, podemos optar por ser conservadores y buscar una solución para estas dificultades dentro del marco de las ideas antiguas.

Dificultades de esta clase, obstáculos inesperados en el desarrollo triunfante de una teoría, repetimos, aparecen frecuentemente en la ciencia. Algunas veces una simple generalización de las ideas antiguas parece, al menos temporalmente, una buena salida. Parecería suficiente, en este caso, ampliar el punto de vista anterior, introduciendo fuerzas más complejas, que actúen entre las partículas elementales. Muy a menudo, sin embargo, resulta imposible remendar una teoría vieja, y las dificultades la llevan a su ocaso y provocan el nacimiento de otra nueva. Aquí no fue únicamente el comportamiento de una pequeña aguja imantada lo que quebró las aparentemente bien fundadas y eficaces teorías mecanicistas. Otro ataque, aún más vigoroso, llegó de un ángulo enteramente diferente. Pero esto es harina de otro costal, que trataremos más adelante.

LA VELOCIDAD DE LA LUZ

En el libro de Galileo *Diálogos sobre dos nuevas Ciencias* podemos escuchar una conversación del maestro y sus alumnos sobre la velocidad de la luz:

«SAGREDO: ¿Pero qué naturaleza y qué magnitud debemos atribuir a la velocidad de la luz? ¿Es instantáneo su desplazamiento o no? ¿No podríamos decidir esta cuestión mediante un experimento?

»SIMPLICIO: Las experiencias diarias muestran que la propagación de la luz es instantánea; cuando vemos disparar una bala de cañón a gran distancia, su fogonazo llega a nuestros ojos instantáneamente, mientras que el sonido lo percibimos después de un intervalo notable.

»SAGREDO: Bien, Simplicio, lo único que podemos inferir de esta experiencia familiar es que, para alcanzar nuestros oídos, el sonido viaja más lentamente que la luz; esta experiencia no me informa de si la luz se propaga instantáneamente o si, siendo inmensamente rápida, emplea un tiempo muy pequeño en llegar a nuestros ojos...

»SALVIATI: Lo poco concluyente de ésta y otras observaciones me ha conducido, una vez, a crear un sistema que permitiría decidir con precisión si la iluminación, o sea, la propagación de la luz, es realmente instantánea...»

Salviati continúa explicando su método. Para entender su idea imaginemos que la velocidad de la luz no sea sólo finita sino, además, que su valor

real se reduzca en una proporción apreciable, análogamente a lo que hacemos al pasar un trozo de una película cinematográfica a cámara lenta.

Dos hombres, A y B, provistos de sendas linternas cubiertas para que no se perciba la luz, están entre sí a una distancia de una milla. Ambos se ponen de acuerdo en lo siguiente: A descubrirá su linterna, y en el momento de percibirla, B descubrirá, a su vez, la suya. Atribuyamos al movimiento reducido de la luz una velocidad de una milla por segundo. A envía una señal al descubrir su linterna; B la percibe un segundo después y envía su señal de respuesta. Esta es recibida por A dos segundos después de haberla emitido él mismo. Luego, si la luz viaja con una velocidad de una milla por segundo, es fácil entender que transcurrirán dos segundos entre los instantes en que A envía y recibe la señal devuelta, en el supuesto, aceptado, de que A y B están, entre sí, a una milla de distancia.

Al revés, si A desconoce la velocidad de la luz y percibe la señal de B dos segundos después de haber emitido la suya —y admite que B cumplió el convenio—, puede inferir que la velocidad de la luz es de una milla por segundo.

Con la técnica experimental conocida en aquel tiempo, Galileo tenía pocas probabilidades, siguiendo el camino esbozado, de determinar la velocidad de la luz. ¡A la distancia real de una milla, tendría que haber podido registrar intervalos de tiempo del orden de una cienmilésima de segundo!

Galileo formuló el problema de la determinación de la velocidad de la luz, pero no lo resolvió. La formulación de un problema es a menudo más importante que su solución, que puede ser cuestión de técnicas matemáticas o experimentales. Para plantear nuevas cuestiones, vislumbrar nuevas posibilidades y considerar viejos problemas desde puntos de vista nuevos que jalonan los avances positivos de la ciencia, se requiere una imaginación creadora. El principio de inercia, y el principio de la conservación de la energía, fueron descubiertos únicamente mediante especulaciones nuevas y originales sobre experimentos y fenómenos ya bien conocidos. La importancia de contemplar hechos ya conocidos a la luz de nuevas teorías se demostrará con varios ejemplos, en las páginas subsiguientes de este libro.

Volviendo a la cuestión relativamente simple de determinar la velocidad de la luz, podemos decir que es sorprendente que Galileo no se hubiera dado cuenta de que su experimento podía haberse realizado en forma más simple y exacta con un solo hombre. En lugar de B, colocado a cierta distancia de A, pudo haber montado un espejo que devolviera automáticamente la señal luminosa en el instante mismo de recibirla.

Aproximadamente doscientos cincuenta años después, este mismo principio fue aplicado por Fizeau, que fue el primero en determinar la velocidad de la luz mediante experimentos terrestres. Roemer la determinó con mucha anterioridad, aunque con menor precisión, mediante observaciones astronómicas.

A la vista de la enorme magnitud de la velocidad de la luz, resulta claro que sólo pudo ser medida tomando distancias comparables a la que separa la Tierra de otro planeta del sistema solar o por un gran refinamiento de la técnica experimental. El primer método es el de Roemer y el segundo el de Fizeau. A partir de estos primeros experimentos notables la magnitud de la velocidad de la luz se ha determinado muchas veces con precisión creciente. Michelson, en nuestro propio siglo, ideó para este fin una técnica altamente refinada. La conclusión a que se llega con estos experimentos es la siguiente: la velocidad de la luz en el *vacío* es, aproximadamente, 186.000 millas o 300.000 kilómetros por segundo.

LA LUZ CONSIDERADA COMO SUSTANCIA

Primeramente empezaremos con unos pocos hechos experimentales. La cifra que acabamos de dar concierne a la velocidad de la luz en el vacío. La luz no perturbada viaja con esta velocidad a través del espacio vacío. Se puede ver a través de un recipiente de vidrio después de extraído el aire de su interior. Nosotros vemos planetas, estrellas, nebulosas, aun cuando la luz viene de ellos hasta nosotros a través del espacio vacío. El simple hecho de que podamos ver a través de un recipiente, contenga o no aire en su interior, muestra que la presencia del aire afecta muy poco la transmisión de la luz. Por esta razón es posible realizar experimentos ópticos en una habitación común con el mismo resultado que si en ella no hubiera aire.

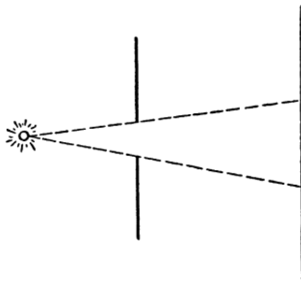


Fig. 36

Uno de los hechos ópticos más simples es el de la propagación de la luz en línea recta. Describiremos un experimento primitivo e ingenuo que así lo demuestra. Frente a una fuente luminosa puntiforme se coloca una pantalla con una pequeña perforación. Una fuente puntiforme es, en realidad, una fuente de luz muy pequeña, por ejemplo, una pequeña abertura en una linterna cubierta. Sobre una pared distante, el orificio de nuestra pantalla se verá como una mancha luminosa sobre fondo oscuro. La figura 36 muestra cómo este fenómeno está relacionado con el de la propagación rectilínea de la luz. Todos aquellos fenómenos, aun los casos más complicados, en que aparecen luz, sombra y penumbra, pueden interpretarse mediante la suposición de que la luz, en el vacío o en el aire, se propaga en línea recta.

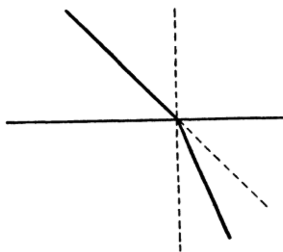


Fig. 37

Tomemos otro ejemplo: un haz de luz que se propaga en el vacío incide sobre una placa de vidrio. ¿Qué sucede? Si la ley de la propagación rectilínea fuera aún válida, la trayectoria sería la indicada en la figura 37 por la línea AOC. Pero en realidad no ocurre esto, sino que en el punto O de incidencia se produce una desviación de la trayectoria, siguiendo una dirección tal como la OB que se indica en la misma figura. Esto constituye el llamado fenómeno de la *refracción*. El hecho familiar de un bastón que parece doblado en su parte sumergida en agua es una de las muchas manifestaciones de la refracción de la luz.

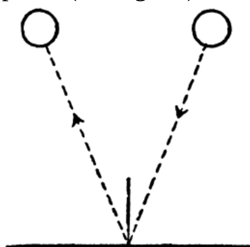
Estos hechos son suficientes para indicar cómo sería posible idear una teoría mecánica simple de la luz. Nos proponemos mostrar a continuación cómo las ideas de sustancias, partículas y fuerzas penetraron en el campo de la óptica y cómo, finalmente, este antiguo punto de vista filosófico se vino abajo.

La teoría surge por sí misma en su forma más simple y primitiva. Supongamos que todos los cuerpos luminosos emiten partículas, *corpúsculos* de luz, los cuales al incidir sobre nuestros ojos dan la sensación de luz. Ya estamos

tan acostumbrados a introducir nuevas sustancias si hacen falta para una explicación mecánica de algún fenómeno, que lo podemos hacer, una vez más, sin mayores preocupaciones.

Estos corpúsculos deben desplazarse a lo largo de líneas rectas a través del vacío con la velocidad conocida, trayendo a nuestros ojos los mensajes de los cuerpos que estén emitiendo luz. Todos los fenómenos que demuestran la propagación rectilínea de la luz refuerzan la teoría corpuscular, pues éste es, precisamente, la clase de movimiento que se había atribuido a los corpúsculos. La teoría explica también, muy sencillamente, la reflexión de la luz en los espejos como una reflexión de la misma clase que la que experimenta una pelota elástica lanzada contra una pared (ver fig. 38).

Fig. 38



La explicación de la refracción es un poco más difícil. Sin entrar en detalles se puede, sin embargo, ver la posibilidad de una explicación mecánica de dicho fenómeno. Esta se basa sobre la suposición de que en la superficie del vidrio, sobre la cual inciden los corpúsculos luminosos, se manifiesta una fuerza que actúa sobre ellos y que procede de la materia, o sea, del vidrio. Una fuerza que —cosa rara— actúa únicamente en la inmediata proximidad de la materia. Toda fuerza que actúa sobre una partícula en movimiento cambia la velocidad de ésta, como ya sabemos. Si la acción resultante sobre los corpúsculos luminosos es una atracción perpendicular a la superficie del vidrio, la nueva trayectoria se encontrará entre su dirección original y la perpendicular en el punto de incidencia. Esta sencilla interpretación del fenómeno que nos ocupa promete éxitos a la teoría corpuscular de la luz. Para determinar la utilidad y el alcance de su validez debemos, sin embargo, exponer hechos más complejos.

EL ENIGMA DEL COLOR

Fue nuevamente el genial Newton quien explicó, por primera vez, la riqueza de colores de nuestro mundo. A continuación damos una descripción suya de uno de sus propios experimentos:

«En el año 1666 (en el cual me dediqué al pulimento de lentes no esféricas), conseguí hacer un prisma triangular de vidrio con el fin de emplearlo en el estudio del notable fenómeno de los colores. Con este fin, habiendo oscurecido mi habitación y hecho un pequeño orificio en las persianas de la ventana para dejar entrar una cantidad conveniente de luz solar, coloqué mi prisma en la proximidad de la abertura, de modo tal que la luz se refractara en el prisma, hacia la pared opuesta. Resultó desde el principio un entretenimiento muy agradable el ver así producido un haz de luz de vívidos e intensos colores.»

La luz del sol es blanca. Después de pasar por un prisma, muestra todos los colores que existen en el mundo visible. La naturaleza misma reproduce este fenómeno en la hermosa gama de colores del arco iris. Las pretensiones de explicar este fenómeno vienen de antiguo. La referencia bíblica de que el arco iris es, por así decirlo, la firma de Dios a un convenio hecho con el hombre, constituye en cierto sentido una "teoría". Pero no explica satisfactoriamente por qué se repite el arco iris de tiempo en tiempo y por qué aparece siempre después de una lluvia. Todo el enigma del color fue por primera vez abordado científicamente por Newton, en cuyos importantes trabajos se indica ya una solución.

Una franja límite del arco iris es siempre roja y la otra violeta. Entre ambos se distribuyen todos los otros colores. He aquí la explicación que da Newton del fenómeno: cada uno de los colores del arco iris existe ya en la luz blanca. Todos juntos atraviesan el espacio interplanetario y la atmósfera y producen el efecto de la luz blanca, que es, por decirlo así, una mezcla de corpúsculos de distintas clases, pertenecientes a los diversos colores. En el caso del experimento de Newton, es el prisma quien los separa en el espacio. De acuerdo con la teoría mecánica, la refracción se debe a fuerzas que actúan sobre los corpúsculos luminosos; fuerzas que tienen su origen en las partículas de vidrio. Estas fuerzas son diferentes para los diferentes corpúsculos de los distintos colores; son máximas para el color violeta y mínimas para el rojo. Cada color se refracta, por eso, a lo largo de una trayectoria distinta y se

separa de los otros colores al emerger del prisma. En el caso del arco iris son las gotitas de agua las que hacen el papel del prisma.

La teoría corpuscular de la luz se complica ahora aún más. No tenemos sólo una sustancia luminosa, sino muchas: una para cada color. Si, sin embargo, hay algo de verdad en la teoría, sus consecuencias deben estar de acuerdo con la observación. La serie de colores en la luz blanca del Sol, revelada por el experimento de Newton, se llama *espectro* del Sol, o más precisamente su *espectro visible*. La descomposición de la luz blanca en sus corpúsculos, como la hemos descrito, se llama *dispersión* de la luz. Los colores separados del espectro deben poder mezclarse nuevamente mediante un segundo prisma, colocado en posición conveniente, pues de lo contrario la explicación sería errónea. Este proceso es, justamente, el inverso del anterior, y debe obtenerse así otra vez luz blanca de los colores previamente separados. Newton demostró experimentalmente que es efectivamente posible obtener luz blanca de su espectro, y de ésta por segunda vez el espectro, y así sucesivamente. Estos experimentos constituyen un sólido apoyo para la teoría según la cual los corpúsculos pertenecientes a cada color se comportan como sustancias inmutables. Newton escribió así:

«...tales colores no se generan repentinamente, sino que se revelan al separarse, ya que, al mezclarse por completo de nuevo, componen otra vez el color original. Por la misma razón, la transmutación mediante la reunión de varios colores no es real, porque cuando los distintos rayos se separan nuevamente reproducen los mismos colores que tenían antes de entrar en la composición; como es sabido, polvos azules y amarillos mezclados íntimamente impresionan nuestros ojos como si fueran verdes, y sin embargo los colores de los corpúsculos no se han transmutado realmente, sino tan sólo mezclado. En efecto, si observamos dicha mezcla con un buen microscopio, veremos entreverados los corpúsculos amarillos y azules.»

Supongamos que hemos aislado una franja muy angosta del espectro. Esto quiere decir que de toda la multitud de colores, sólo se ha dejado pasar uno a través de una ranura apropiada de una pantalla que retiene a los demás. El haz que pasa a través de dicha ranura se llama luz *homogénea*, o sea, luz que no puede experimentar nueva descomposición. Esto es una consecuencia de la teoría y puede fácilmente confirmarse mediante el experimento. De ninguna manera se puede dividir otra vez tal haz de un solo color. Es fácil obtener

fuentes de luz homogénea. Por ejemplo, el sodio incandescente emite luz homogénea de color amarillo. Resulta a menudo conveniente realizar ciertos experimentos ópticos con luz homogénea, pues, como fácilmente se entiende, el resultado será mucho más sencillo.

Supongamos que suceda repentinamente una cosa muy extraña: que el Sol comenzara a emitir, únicamente, luz homogénea de un determinado color: sea el amarillo. La gran variedad de colores de la Tierra desaparecería inmediatamente. ¡Todas las cosas se presentarían amarillas o negras! Esta predicción es una consecuencia de la teoría corpuscular de la luz, que no permite la creación de colores nuevos. Su validez puede confirmarse mediante el experimento: en una habitación iluminada únicamente con luz de sodio incandescente se ve todo amarillo o negro. La riqueza de colores del mundo es reflejo de la variedad de colores que componen la luz blanca. La teoría corpuscular de la luz parece responder espléndidamente a todos estos casos, aun cuando la necesidad de introducir tantas sustancias como colores nos coloca en una situación incómoda. La suposición de que todas las partículas de la luz tienen exactamente una misma velocidad en el vacío parece también artificial.

Es imaginable que otro conjunto de suposiciones, una teoría de carácter totalmente distinto, sea capaz de explicar, tan satisfactoriamente como la que expusimos, los fenómenos que nos ocupan ahora. En efecto, pronto veremos el origen de otra teoría basada sobre conceptos enteramente distintos y que sin embargo explica el mismo conjunto de fenómenos ópticos. Pero antes de formular las hipótesis fundamentales de esa nueva teoría debemos explicar una cuestión que no tiene conexión directa con estas consideraciones ópticas. Debemos volver hacia la mecánica y preguntarnos:

¿QUÉ ES UNA ONDA?

Un rumor originado en Washington llega a Nueva York muy rápidamente, aun cuando ni una sola persona de las que toman parte en difundirlo haga el viaje para ese fin. Tenemos aquí dos movimientos diferentes: el rumor que va de Washington a Nueva York y el de las personas que lo difunden. El viento que pasa sobre un campo de trigo determina un movimiento en forma de onda, que se difunde a lo largo de toda una extensión. Podemos distinguir en este caso nuevamente los dos movimientos, el de propagación de la onda y el movimiento de cada una de las espigas, las cuales ejecutan sólo pequeños desplazamientos de vaivén; es decir, pequeñas oscilaciones. Todo el mundo

ha visto alguna vez las ondas que se propagan en forma de círculos, que se agrandan paulatinamente, cuando se arroja una piedra sobre la superficie tranquila del agua de un río o de un estanque. El movimiento de avance de la onda es una cosa, y otra el movimiento de las partículas del agua. Estas partículas se limitan a subir y bajar en el mismo sitio. En cambio, el movimiento de la onda es la propagación de un estado de perturbación de la materia y no la propagación de la materia misma. Un corcho que flota sobre el agua demuestra lo anterior claramente, pues se mueve de arriba abajo imitando el movimiento verdadero del agua y no se desplaza junto con la onda.

Con el objeto de entender mejor el mecanismo de una onda, vamos a imaginar un experimento ideal. Supongamos cierto espacio lleno completa y uniformemente de agua, aire u otro medio. En algún punto de este medio, exento de movimiento, hay una esfera quieta. De repente, esta esfera comienza a "respirar" rítmicamente, aumentando y disminuyendo de volumen, pero sin cambiar de forma. ¿Qué acontecerá entonces en el medio? Empecemos nuestras observaciones en el preciso momento en que la esfera inicia su dilatación. Las partículas del medio que están en la inmediata vecindad de la esfera resultan empujadas hacia fuera, de tal manera que la densidad de la capa esférica de dicho medio aumenta por encima de su valor normal. Del mismo modo, cuando la esfera se contrae, la densidad de aquella parte del medio que rodea la esfera disminuye. Estos cambios de densidad se propagan a través de todo el medio. Las partículas que lo constituyen ejecutan sólo pequeñas vibraciones, pero el movimiento global resultante es el de una onda progresiva. El asunto esencialmente nuevo aquí es que por vez primera estamos considerando el movimiento de algo que no es materia, sino energía que se propaga a través de la materia.

Basándonos en el ejemplo de la esfera pulsante, podemos introducir dos conceptos físicos generales e importantes para la caracterización de las ondas. El primero, que depende del medio, es el de la velocidad con que se propaga la onda; esta velocidad es diferente, por ejemplo, si el medio es agua o aire. El segundo concepto es el de *longitud de onda*. En el caso de las ondas en el agua, mar o río, es la distancia entre dos valles o dos crestas inmediatas. Las olas del mar tienen en general mayor longitud de onda que las del río. En el caso de las ondas producidas por la esfera pulsante, la longitud de onda es la distancia entre dos superficies esféricas que muestran máximos o mínimos de densidad.

Es evidente que esta distancia no dependerá del medio solamente. La rapidez de la pulsación de la esfera tendrá, por cierto, su influencia en el asunto,

resultando la longitud de onda más corta si la pulsación se hace más rápida y viceversa.

El concepto de onda resultó muy fecundo en la física. Es decididamente un concepto mecánico. El fenómeno se reduce al movimiento de partículas que, de acuerdo con la teoría cinética, son las que constituyen la materia. Luego, toda teoría que se vale del concepto de onda puede en general considerarse como una teoría mecánica; por ejemplo: la interpretación de los fenómenos acústicos se basa esencialmente en dicho concepto. Los cuerpos vibrantes, tales como las cuerdas vocales o las de un violín, son fuentes de ondas que se propagan a través del aire de una manera análoga a las ondas producidas en el caso de la esfera. Luego, por medio del concepto de onda es posible reducir todos los fenómenos acústicos a fenómenos mecánicos.

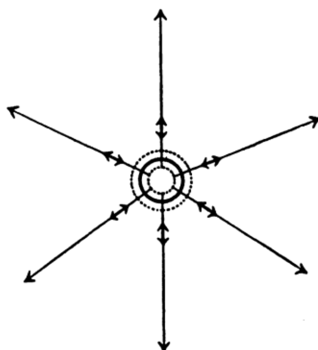


Fig. 39

Se ha insistido ya en la necesidad de distinguir entre el movimiento de las partículas y el movimiento de la onda en sí, que es una perturbación del estado del medio. Estos dos movimientos son completamente distintos, pero es evidente que, en el ejemplo de la esfera pulsante, ambos movimientos tienen lugar sobre una misma línea recta. Las partículas del medio oscilan a lo largo de cortos segmentos rectilíneos y la densidad del medio aumenta y disminuye periódicamente, de acuerdo con el movimiento de las partículas. La dirección de propagación de la onda y la de las oscilaciones de las partículas son una misma cosa que está esquemáticamente representada en la figura 39. Este tipo de onda se llama *longitudinal*.

¿Será ésta la única clase de onda posible? Es de importancia para nuestras consideraciones futuras ver la posibilidad de existencia de otro tipo de onda llamada *transversal*.

Modifiquemos nuestro ejemplo anterior. Supongamos la misma esfera sumergida, esta vez, en un medio de distinta naturaleza; en algo así como una especie de jalea o gelatina, en lugar de aire o agua. Además la esfera en este caso no pulsa, sino que gira un pequeño ángulo en determinado sentido y después vuelve a su posición primitiva, repitiéndose este movimiento de una manera rítmica y alrededor de un eje fijo. Dado que la gelatina se adhiere a la esfera, la capa adherida se verá forzada a acompañar a la esfera en su movimiento de vaivén. Esta capa obligará a su vez a la inmediata a entrar en movimiento análogo, y así sucesivamente estableciéndose una onda en el medio. Si recordamos la distinción entre el movimiento de las partículas del medio y el movimiento de la onda, vemos que en este caso no tiene la misma dirección. En efecto, la onda se propaga en la dirección del radio de la esfera, mientras que las partículas del medio se mueven perpendicularmente a esa dirección radial (fig. 40). Hemos producido así una onda transversal. Las ondas en el agua son transversales. Un trozo de corcho que flote sobre la superficie del agua sube y baja solamente, pero la onda se difunde a lo largo de un plano horizontal. Las ondas sonoras, por otra parte, constituyen el ejemplo más común de ondas longitudinales.

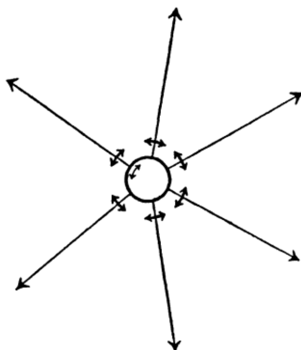


Fig. 40

Hagamos otra observación: la onda producida por una esfera pulsante u oscilante, en un medio homogéneo, es una onda *esférica*. Se llama así porque en todo momento los puntos que se hallan sobre cualquier superficie esférica concéntrica a la esfera fuente, se comportan de idéntica manera. Consideremos una porción de una tal superficie esférica a gran distancia de la fuente. Cuanto más lejana y de menor tamaño sea la porción considerada, tanto más se asemejará a una *onda plana,* como se ve en el esquema de la figura 41. Se puede afirmar, sin demasiada pretensión de rigor científico, que no hay una

diferencia esencial entre un plano y una porción de esfera de radio suficientemente grande.

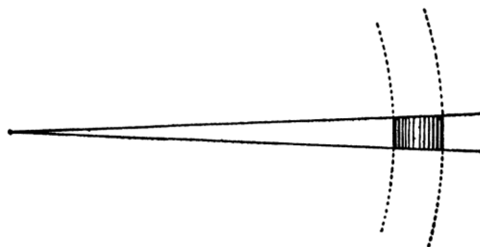


Fig. 41

Muy a menudo se consideran como ondas planas las pequeñas partes de una onda esférica que están muy alejadas de la fuente. El concepto o significado verdadero de una onda plana, como muchos otros conceptos físicos, no es más que una ficción, realizable únicamente con cierto grado de exactitud. Es, sin embargo, un concepto útil que necesitaremos más adelante.

LA TEORÍA ONDULATORIA DE LA LUZ

Recordemos por qué hemos interrumpido la descripción de los fenómenos ópticos. Nuestro propósito era introducir una nueva teoría de la luz, distinta de la corpuscular, pero igualmente eficaz para explicar el mismo conjunto de fenómenos luminosos. Para llevar a cabo este objetivo, nos vimos obligados a interrumpir nuestra exposición e introducir el concepto de onda. Ahora estamos en condiciones de volver al tema.

Fue Huygens, contemporáneo de Newton, quien emitió una teoría completamente nueva acerca de la luz. En su tratado sobre el asunto puede leerse:

«Si la luz emplea cierto tiempo para recorrer una determinada distancia, resulta que este movimiento, comunicado a la materia en la cual se propaga, es sucesivo y, por consiguiente, se difunde, como el sonido, por superficies esféricas y ondas. Y las llamo ondas por su semejanza con las que se forman sobre el agua cuando se arroja una piedra sobre su superficie; ondas que presentan un ensanchamiento sucesivo en forma de círculos, aun cuando la causa sea distinta de la de las ondas luminosas y estén éstas en una superficie plana.»

Según la teoría de Huygens, la luz no es una sustancia, sino una transferencia de energía en forma de onda. Hemos visto que la teoría corpuscular

explica muchos hechos observados en el campo de la óptica. ¿Puede hacer otro tanto la teoría ondulatoria? Plantearemos nuevamente los problemas que se han explicado mediante la teoría corpuscular, para tratar de ver si la teoría ondulatoria puede, a su vez, explicarlos satisfactoriamente. Haremos esto en forma de diálogo entre N y H. N cree en la teoría corpuscular de Newton y H en la ondulatoria de Huygens. A ninguno de ellos le es permitido usar argumentos desarrollados con posterioridad a los trabajos de los grandes sabios.

N. — En la teoría corpuscular, la velocidad de la luz tiene un significado concreto. Es la velocidad con que se propagan los corpúsculos en el vacío. ¿Cuál es la interpretación de dicha velocidad en la teoría ondulatoria?

H. — Significa, naturalmente, la velocidad de la onda luminosa. Toda onda conocida se propaga con una determinada velocidad y lo mismo ocurre con una onda luminosa.

N. — Esto no es tan simple como parece. Las ondas sonoras se propagan en el aire, las olas oceánicas en el agua. Toda onda requiere un medio material a través del cual se propague. Pero la luz atraviesa el vacío, en el cual el sonido no se propaga. Admitir una onda en el vacío es realmente no admitir onda alguna.

H. — Sí, esto es una dificultad, aunque no nueva para mí. Mi maestro pensó detenidamente este asunto y decidió que la única salida es admitir la existencia de una sustancia —el éter—, que es un medio transparente y ubicuo. El Universo está, por decirlo así, sumergido en el éter. Si nos decidimos por la introducción de este concepto, todo resultará claro y convincente.

N. — Pero yo objeto semejante suposición. En primer término, introduce una nueva sustancia hipotética, y ya tenemos demasiadas de esas sustancias en la física. Hay además una segunda razón para oponerse a tal hipótesis. Es indudable que usted también cree que debemos explicar todos los fenómenos en términos mecánicos. Pero, ¿qué me dice del éter? ¿Puede contestar usted la sencilla cuestión de cómo está constituido de partículas elementales el éter y cómo se manifiesta en otros fenómenos?

H. — La primera objeción está ciertamente justificada. Pero por la introducción de esa materia artificial e imponderable —el éter— nos libramos en el acto de los mucho más artificiales corpúsculos luminosos. Tenemos aquí sólo una sustancia “misteriosa” en lugar de un número infinito de ellas, correspondientes a otros tantos colores del espectro. ¿No piensa usted que esto constituye un progreso real? Por lo menos todas las dificultades se concentran en un solo punto. No necesitamos ya la suposición artificiosa

de que las partículas correspondientes a los distintos colores se propagan todas con una misma velocidad en el vacío. Su segundo argumento también es correcto. No podemos dar una interpretación mecánica del éter. Pero no hay duda de que investigaciones futuras de la óptica, y tal vez de otros fenómenos, revelarán su estructura. Por el momento tenemos que esperar nuevos experimentos y conclusiones. Pero tengo la esperanza de que finalmente seremos capaces de esclarecer el problema de la estructura mecánica del éter.

N. — Dejemos este asunto para otro momento, ya que no podemos resolverlo ahora. Me gustaría saber cómo explica su teoría, dejando de lado las anteriores dificultades, los fenómenos que nos aparecen claros e inteligibles a la luz de la teoría corpuscular. Tomemos, por ejemplo, el hecho de la propagación rectilínea de los rayos luminosos en el vacío. Un trozo de papel colocado enfrente de una lámpara produce sobre la pared una sombra bien delimitada. No sería posible la formación de sombras nítidas si la teoría ondulatoria fuera correcta, porque las ondas bordearían los extremos de la pantalla y aquéllas aparecerían esfumadas. Una pequeña embarcación, como usted sabe, no es un obstáculo insalvable para las olas del mar, ya que la rodean y continúan del otro lado de ella.

H. — Esto no es un argumento decisivo en contra. Supongamos que ondas cortas de un río incidan sobre el costado de un barco muy grande; se observa que no pasan al otro lado de él. Si las ondas son bastante pequeñas y el buque bastante grande, se puede decir que también en este caso se producen sombras nítidas. Es muy probable que la luz parezca propagarse en línea recta, únicamente porque su longitud de onda es muy pequeña en comparación con el tamaño de los obstáculos comunes y de las aberturas usadas en los experimentos. Pero si nos fuera posible idear obstáculos bastante pequeños, es probable que no se produjeran sombras nítidas. Comprendemos que la construcción de tales aparatos que prueben que la luz tiene la propiedad de doblarse pueda, experimentalmente, ser muy difícil. Sin embargo, si se pudiera realizar, ello constituiría un experimento crucial para decidir entre la teoría ondulatoria y la teoría corpuscular de la luz.

N. — La teoría ondulatoria puede conducir al descubrimiento de nuevos hechos en el futuro, pero no conozco ningún dato experimental que la confirme convincentemente Mientras no se pruebe experimentalmente que la luz puede contornear un obstáculo, no veo ninguna razón para no creer en la teoría corpuscular, que me parece más simple y, por lo tanto, mejor que la teoría ondulatoria.

A esta altura podemos interrumpir el diálogo, aun cuando el asunto no esté agotado.

Nos resta mostrar qué explicación da, de la refracción de la luz y de la gran variedad de colores, la teoría ondulatoria; hechos que, como sabemos, explica la teoría corpuscular. Empezaremos con la refracción: pero nos será útil considerar primeramente un ejemplo que nada tiene que ver con la óptica.

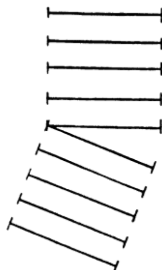


Fig. 42

Supongamos que dos personas estén caminando por un gran espacio abierto, sosteniendo entre ambas una barra rígida. Al principio caminan en línea recta y con la misma velocidad. Mientras sus velocidades sean iguales, pequeñas o grandes, la barra experimentará desplazamientos paralelos a su posición original, esto es, sin girar ni cambiar de dirección. Todas las posiciones consecutivas de la barra son paralelas entre sí. Ahora, imaginemos que por un momento, que puede ser hasta de una fracción de segundo, las velocidades de ambos hombres no sean las mismas. ¿Qué sucederá? Es evidente que durante este momento la barra girará. Cuando las velocidades se igualen nuevamente, el movimiento se efectuará según una dirección distinta de la primitiva, como se ve, claramente, en la figura 42. El cambio de dirección tuvo lugar en el intervalo de tiempo en que las velocidades de los dos caminantes fueron diferentes.

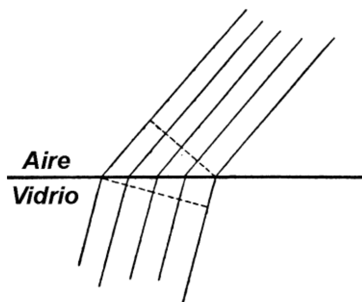


Fig. 43

Este ejemplo nos permitirá entender la refracción de una onda. Supongamos que una onda plana que se propaga en el vacío incide sobre una superficie plana de vidrio. En la figura 43 hemos representado una onda que presenta, en su avance, un frente relativamente ancho. El frente de onda es un plano sobre el cual, en cualquier instante, todas las partículas del éter se comportan de una misma manera. Como la velocidad depende del medio por el cual viaja la luz, tendrá en el vidrio un valor distinto del que tiene en el vacío. Durante el pequeño intervalo en que el frente de onda penetra en el vidrio, las diferentes partes de dicho frente tendrán diferentes velocidades. Es claro que la parte del frente de la onda incidente que ha alcanzado la superficie del vidrio cambiará su velocidad primitiva por la que tiene la luz en el vidrio, mientras el resto seguirá moviéndose con la velocidad de la luz en el vacío. A causa de esta variación de la velocidad a lo largo del frente de onda durante el tiempo de su penetración en el vidrio, la dirección de ésta debe cambiar.

Así vemos que la teoría corpuscular no es la única capaz de explicar el fenómeno de la refracción de la luz, también lo es la teoría ondulatoria. Consideraciones ulteriores, empleando un poco de matemáticas, prueban que la explicación de la teoría ondulatoria es más sencilla y mejor, y que las consecuencias de la interpretación ondulatoria están en perfecto acuerdo con la observación. Dichas consideraciones matemáticas o métodos cuantitativos de razonamiento nos permiten, por ejemplo, deducir la velocidad de la luz en un medio refringente, conociendo cómo se refracta un haz luminoso al atravesarlo. Mediciones directas confirman espléndidamente esas deducciones y, en consecuencia, la teoría ondulatoria de la luz.

Queda aún el problema del color.

Recordemos que un movimiento ondulatorio riza por dos números, el de su velocidad y el de su longitud de onda. Para resolver el problema del color, la teoría ondulatoria postula que a *diferentes colores corresponden diferente longitudes de onda*. De acuerdo con esto, la longitud de onda de luz amarilla será distinta de la longitud de onda de la luz roja o violeta. En lugar de la segregación artificial de los corpúsculos pertenecientes a los distintos colores, tenemos la diferencia natural de longitud de onda. Resulta, pues que los experimentos de Newton sobre la dispersión de la luz pueden describirse en dos lenguajes distintos la descripción corpuscular y la descripción ondulatoria. Por ejemplo:

Lenguaje corpuscular	**Lenguaje ondulatorio**
Los corpúsculos pertenecientes a los distintos colores tienen la misma velocidad en el vacío, pero velocidades distintas en el vidrio.	Los rayos de distintas longitudes de ondas, pertenecientes a los distintos colores, tienen una misma velocidad en el éter (o en el vacío). Pero son diferentes en el vidrio.
La luz blanca es una mezcla de corpúsculos de los distintos colores, mientras que en el espectro están separados.	La luz blanca es una superposición de ondas de distintas longitudes, mientras que en el espectro están separadas.

Parecería prudente evitar la ambigüedad resultante de la existencia de dos teorías para un mismo fenómeno, decidiéndose en favor de una o de la otra, después de una cuidadosa consideración de los méritos y defectos de cada una. El diálogo entre N y H muestra que ello no es tan fácil. La decisión, a la altura de los conocimientos de N y H, sería más bien cuestión de gusto que fruto de una convicción científica. En la época de Newton —e incluso más de cien años después— muchos físicos se inclinaron por la teoría corpuscular. Sólo a mitad del siglo XIX la historia dio su veredicto en favor de la teoría ondulatoria de la luz. En su conversación con H, N expresa que en principio existe la posibilidad de una decisión experimental entre las dos teorías. La teoría corpuscular implica la existencia de sombras nítidas y no admite, pues, que la luz pueda bordear un obstáculo o cuerpo opaco. Por otro lado, según la teoría ondulatoria, un objeto suficientemente pequeño no producirá sombra alguna. Los trabajos de Young y Fresnel demostraron experimentalmente esto último, extrayendo, además, nuevas consecuencias teóricas para la teoría de la luz.

Ya referimos el sencillo experimento en que una pantalla con un pequeño orificio se colocaba delante de una fuente puntiforme de luz y aparecía una sombra en la pared.

Simplifiquemos nuestro experimento suponiendo que la fuente emita luz homogénea. Imaginemos que el orificio de la pantalla se reduce gradualmente de tamaño. Si se usa una fuente intensa y se puede llegar a obtener un orificio suficientemente pequeño, se produce un fenómeno nuevo y sorprendente, algo completamente incomprensible desde el punto de vista de la teoría corpuscular: desaparece la distinción nítida entre la zona que correspondería —aparentemente— a la sombra y a la zona iluminada. La luz se esfuma gradualmente hacia el fondo sombreado en una serie alternada de anillos luminosos y oscuros. La aparición de tales anillos es muy característica de la teoría

ondulatoria. La explicación del curioso fenómeno que nos ocupa se hará evidente adoptando una disposición experimental algo distinta. Supongamos una hoja de papel negro con dos orificios hechos con la punta de un alfiler, a través de los cuales puede pasar la luz. Si los orificios están próximos entre sí y si la luz es homogénea y de suficiente intensidad, aparecerán muchas bandas luminosas y oscuras sobre la pared que se halle detrás de la pantalla —bandas luminosas que disminuyen de intensidad a medida que se alejan del centro de la zona iluminada— internándose en la zona oscura. La explicación es sencilla. Se forma una franja oscura en el lugar donde se encuentra la cresta de la onda procedente de uno de los orificios con el valle de la onda luminosa procedente del otro orificio, de manera tal que se anulan recíprocamente. Las bandas luminosas se forman, en cambio, en los lugares donde se encuentran dos valles o dos crestas de ambas ondas reforzándose en esta forma sus efectos. La explicación se complica algo en el caso de los anillos claros y oscuros del ejemplo anterior en que usamos una pantalla con un solo orificio; pero el principio es el mismo. La aparición de franjas y de anillos claros y oscuros alternados en los casos de dos orificios o un orificio iluminado, respectivamente conviene retenerla en la memoria; más adelante volveremos sobre esto.

Las experiencias descritas aquí constituyen el fenómeno de la *difracción* de la luz, o sea la desviación de la propagación rectilínea que efectúa la luz, cuando encuentra en su camino orificios u obstáculos suficientemente pequeños.

Con la ayuda de un poco de matemáticas, podemos llegar mucho más lejos. Es posible, así, calcular el valor que debe tener la longitud de onda de cierto color de luz, para que produzca determinada imagen de difracción. Por lo que antecede vemos que los experimentos descritos nos permiten determinar la longitud de onda de los distintos colores que emite la fuente usada. Para tener una idea de la pequeñez de estos valores, damos a continuación las longitudes de onda que corresponden a los extremos del espectro solar, esto es, el rojo y el violeta.

La longitud de onda de la luz roja es de 0,000 08 centímetros.

La longitud de onda de la luz violeta es de 0,000 04 centímetros.

No debemos asombrarnos de la pequeñez de estos números. En efecto, el fenómeno de la formación de las sombras nítidas, o sea el fenómeno de la propagación rectilínea de la luz, se observa en la naturaleza únicamente porque las aberturas y obstáculos comunes son muy grandes comparados con las longitudes de onda de la luz. Únicamente cuando se usan obstáculos u orificios muy pequeños es cuando se revela su naturaleza ondulatoria.

Pero la historia de la búsqueda de una teoría que explique la naturaleza de la luz no acaba aquí. El gran triunfo del siglo XIX, su veredicto favorable a la teoría ondulatoria, no fue la última palabra en esta importante cuestión. Para el físico actual el problema de optar entre corpúsculos y ondas se ha planteado nuevamente, esta vez, de una manera mucho más profunda e intrincada. Aceptemos a derrota de la teoría corpuscular de la luz hasta el momento en que se nos revele el carácter problemático del triunfo de la teoría ondulatoria.

¿SON LONGITUDINALES O TRANSVERSALES LAS ONDAS LUMINOSAS?

Todos los fenómenos ópticos que hemos considerado hablan a favor de la teoría ondulatoria. La propiedad de la luz de bordear pequeños obstáculos, y la explicación de la refracción, son los argumentos más sólidos a su favor. Guiados por el punto de vista mecánico, nos damos cuenta de que falta aún resolver un problema: la determinación de las propiedades mecánicas del éter. Para resolver este problema resulta esencial saber si las ondas luminosas en el éter son longitudinales o transversales. En otras palabras: ¿se propaga la luz como el sonido? Es decir: ¿se debe la onda luminosa a cambios de densidad del medio, de manera que las oscilaciones de las partículas se producen en la dirección de la propagación de la onda? ¿O es que el éter se parece a una gelatina elástica, medio en el cual sólo ondas transversales pueden producirse y cuyas partículas se mueven perpendicularmente a la dirección en que se propaga la onda?

Antes de dar una solución a este problema, veamos cuál de los dos casos preferiríamos fuese el verdadero.

Sería una suerte, evidentemente, que las ondas luminosas fueran longitudinales. Las dificultades para imaginar un éter mecánico serían menores en este caso. Nuestra imagen del éter podría ser probablemente algo parecido a la imagen mecánica de un gas que permite la explicación de la propagación de las ondas sonoras. En cambio, las dificultades aumentarían al tratar de idear un éter que propague ondas transversales. No es cosa sencilla imaginar un medio constituido por partículas, parecido a una gelatina, para que sea capaz de transmitir ondas transversales. Huygens era de opinión que el éter tendría una estructura parecida a la del aire y no a la de una gelatina. Pero la naturaleza se preocupa muy poco de nuestras limitaciones. ¿Fue benigna la

naturaleza con los físicos que intentaban interpretar todos los hechos desde el punto de vista mecánico? A fin de responder a esta pregunta, debemos referir y discutir algunos experimentos nuevos.

Consideremos en detalle sólo uno de los muchos experimentos capaces de darnos una respuesta. Supongamos una fina placa de cristal llamada turmalina, cortada de una manera particular que no hace falta considerar aquí. La placa de cristal tiene que ser fina, para que pueda verse a través de ella una fuente luminosa. Supongamos ahora que un observador toma dos de estas turmalinas y las coloca entre nuestros ojos y la fuente luminosa. ¿Qué verá? Seguirá viendo la fuente luminosa si las placas son, como dijimos, suficientemente finas. Hay mucha probabilidad de que la experiencia confirme esta predicción.

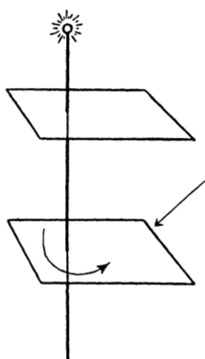


Fig. 44

Sin entrar a discutir si esto es o no muy probable, supongamos que la luz se ve, realmente, a través de los dos cristales. A continuación cambiemos gradualmente la posición de uno de los dos cristales haciéndolo girar. Esto último tiene sentido si se fija el eje alrededor del cual se verifica la rotación. Tomaremos como tal la línea determinada por el rayo incidente (v. fig. 44). Quiere decir que desplazamos todos los puntos del cristal en cuestión, excepto los puntos del eje. En tal caso se da un fenómeno curioso: la luz se hace más y más débil hasta desaparecer totalmente. Reaparece si continúa la rotación, y vuelve a su intensidad primitiva cuando el cristal vuelve, también, a su posición inicial.

Sin entrar en los detalles de éste y otros experimentos similares, podemos plantearnos la siguiente proposición: ¿podrían estos fenómenos explicarse si las ondas luminosas fueran longitudinales? En el caso de ondas longitudinales, las partículas del éter se moverían a lo largo del eje que coincide con el

rayo incidente. Si el cristal gira, nada cambia a lo largo del eje: sus puntos no se mueven y sólo en su proximidad se producen pequeños desplazamientos. No podría ocurrir un cambio tan radical como el descrito de la aparición y desaparición de la luz. Este y muchos otros fenómenos similares sólo pueden explicarse admitiendo que las ondas luminosas son transversales y no longitudinales. En otras palabras, nos vemos obligados a admitir la naturaleza gelatinosa del éter.

¡Esto es terrible! Debemos estar preparados para enfrentarnos con dificultades grandes al hacer una descripción mecánica del éter.

EL ÉTER Y EL PUNTO DE VISTA MECANICISTA

La exposición de las distintas tentativas hechas para interpretar la naturaleza mecánica del éter como medio apropiado para transmitir la luz sería demasiado extensa. Una constitución mecánica significa, como sabemos, que la sustancia está formada de partículas entre las cuales existen fuerzas que actúan a lo largo de las líneas que las unen y que dependen solamente de la distancia que media entre ellas. Con el objeto de imaginar el éter como sustancia mecánica tipo gelatina, los físicos tuvieron que ensayar hipótesis muy artificiosas y antinaturales. No las citaremos aquí; pertenecen al pasado casi olvidado. Pero las consecuencias de esas suposiciones fueron importantes y significativas. El carácter artificial de dichas suposiciones, la necesidad de introducir tantas hipótesis, todas independientes entre sí, fue suficiente para trastornar la creencia en la concepción mecanicista. A más de las dificultades para imaginar la constitución mecánica del éter, hay otras objeciones más sencillas. En efecto, si queremos explicar mecánicamente los fenómenos ópticos, debemos suponer que el éter existe por todas partes. No puede haber espacio absolutamente vacío si la luz se propaga sólo a través de un medio: el éter. Por la mecánica sabemos, sin embargo, que el espacio interestelar no ofrece resistencia al movimiento de los cuerpos materiales, los planetas, por ejemplo, viajan a través del éter-gelatina sin encontrar resistencia alguna, como la que ofrecería a su movimiento cualquier medio material. Si el éter no perturba el movimiento de la materia, no puede haber acción recíproca entre las partículas del mismo y las de la materia. Ahora bien, la luz pasa a través del éter, como también a través del vidrio y del agua, pero cambiando la velocidad en estas últimas sustancias; ¿cómo puede explicarse este hecho mecánicamente? Sólo admitiendo cierta acción recíproca entre las partículas

de la materia y las del éter. Hace poco vimos que no se manifiestan tales interacciones en el caso de cuerpos en movimiento libre por el espacio. En otras palabras, hay interacción entre el éter y la materia en los fenómenos ópticos, pero no hay tal acción recíproca en los fenómenos mecánicos. ¡Esta es, en efecto, una conclusión muy paradójica!

Parece que existe sólo un camino para salir de todas estas dificultades. Con la idea de interpretar los fenómenos de la naturaleza desde el punto de vista mecánico, fue necesario durante el desarrollo de de la ciencia hasta el siglo XX, introducir distintas sustancias artificiales, como los fluidos eléctricos y magnéticos, los orsculgtiiminosos o el éter. El resultado de ese propósito fue sencillamente la concentración de todas las dificultades en unos pocos puntos esenciales, tales como el éter en el caso de los fenómenos ópticos. El hecho de que todas las tentativas de idear un éter de una manera sencilla resultaran infructuosas, junto a las otras objeciones que mencionamos, parece indicar que la falla reside en la suposición fundamental de que es posible explicar los fenómenos de la naturaleza desde un punto de vista mecanicista. La ciencia no tuvo éxito al querer llevar a cabo, de una manera convincente, el programa mecanicista, y hoy ningún físico cree en la posibilidad de su realización.

En nuestra breve reseña de las principales nociones físicas, hemos encontrado ciertos problemas no resueltos y dificultades y obstáculos que se opusieron a las tentativas de crear una imagen uniforme y congruente de todos los fenómenos del mundo exterior. Recordemos la inexplicable coincidencia entre la masa inerte y la masa gravitatoria, indicio que para la mecánica clásica pasó inadvertido. Hemos visto el carácter artificial de los fluidos eléctricos y magnéticos. Señalamos una dificultad no resuelta en la fuerza de acción recíproca entre la corriente eléctrica y una aguja magnética. Fuerza que no actúa en la línea de unión del conductor y el polo magnético y que además depende de la velocidad de la carga eléctrica móvil. La ley que expresa su magnitud es extremadamente complicada. Y por fin tenemos las graves dificultades que nos plantea el éter.

La física moderna ha atacado y resuelto estos problemas; pero, en la brega para hallar estas soluciones, se han creado nuevos y más hondos problemas. Nuestro conocimiento es ahora más amplio y más profundo que el de un físico del siglo XIX, pero también lo son nuestras dudas y dificultades.

RESUMEN

En las teorías antiguas de los fluidos eléctricos, en las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz, tenemos otras tantas tentativas de interpretación mecanicista. Pero esta interpretación encuentra graves dificultades en el campo de los fenómenos ópticos y eléctricos.

Una carga móvil actúa sobre una aguja magnética, pero con una fuerza que no depende solamente de la distancia sino también de la velocidad de la carga. La fuerza no atrae ni repele, sino que actúa perpendicularmente a la línea de unión de la aguja y la carga.

En la óptica tenemos que decidirnos en favor de la teoría ondulatoria de la luz. Ahora bien, suponer ondas que se propagan en un medio compuesto de partículas, entre las cuales actúan fuerzas mecánicas, constituye evidentemente una concepción mecanicista.

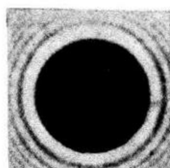
Pero, ¿en qué consiste ese medio a través del cual se propaga la luz, y cuáles son sus propiedades mecánicas? Según vimos, no hay esperanza de reducir los fenómenos ópticos a fenómenos mecánicos sin contestar antes la pregunta anterior. Pero las dificultades encontradas al tratar de resolver este problema son tan grandes, que no nos queda otro remedio que abandonar esa tentativa y, por lo tanto, abandonar la interpretación mecanicista de la naturaleza.

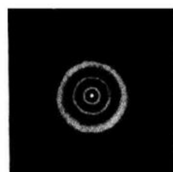
Lámina 2



Fotografías de V. Arkadiev

Fig. 45a. *Izquierda*: Vemos una fotografía de puntos de luz luego que dos haces han pasado a través de dos pequeñas perforaciones, una detrás de la otra (Una perforación fue abierta, luego tapado y la otra abierta). *Derecha*: Luego vemos bandas que la luz ha formado al pasar a través de ambas perforaciones simultáneamente.

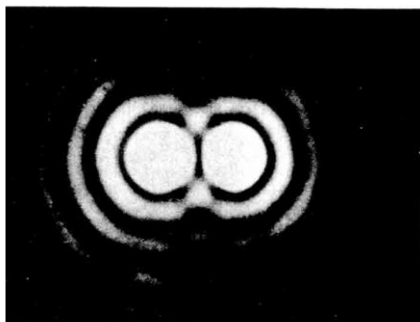




Fotografías de V. Arkadiev

Fig. 45b. Difracción de la luz al rodear un pequeño obstáculo.

Fig. 45c. Difracción de la luz al pasar por un pequeño agujero.



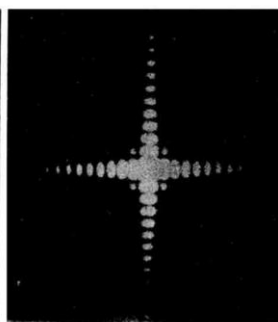


Fig. 46. Los fenómenos de difracción, de los que las dos fotografías son un ejemplo, permiten ver con claridad la naturaleza ondulatoria de la luz.

3. CAMPO Y RELATIVIDAD

EL CAMPO COMO REPRESENTACIÓN

Durante la segunda mitad del siglo XIX, se introdujeron en la física ideas nuevas y revolucionarias, que abrieron el camino a un nuevo punto de vista filosófico, distinto del anterior mecanicista. Los resultados de los trabajos de Faraday, Maxwell y Hertz condujeron al desarrollo de la física moderna, a la creación de nuevos conceptos que constituyeron una nueva imagen de la realidad.

Nos proponemos describir, en las páginas que van a continuación, la revolución producida en la ciencia por esos nuevos conceptos y mostrar cómo ganaron éstos, a su vez, en claridad y fuerza. Trataremos de reconstruir lógicamente la línea de su desarrollo, sin preocuparnos demasiado de su orden cronológico.

Los conceptos nuevos se originaron en el estudio de los fenómenos eléctricos, pero resulta más sencillo introducirlos a través de la mecánica. Sabemos que dos partículas se atraen mutuamente con una fuerza que decrece con el cuadrado de la distancia. Podemos representar este hecho de una manera original como se hace en la figura 47, a pesar de que resulta difícil comprender qué se gana con ello.

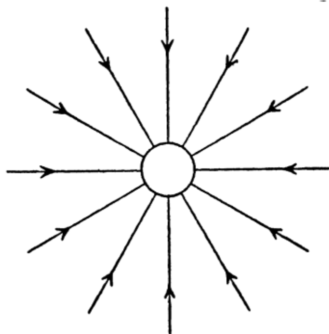


Fig. 47

El pequeño círculo del gráfico representa el cuerpo atrayente, como, por ejemplo, el Sol. En realidad este diagrama debe imaginarse en el espacio y

no como una figura plana. El círculo representa, entonces, una esfera, la del Sol, en nuestro ejemplo. Un cuerpo, el llamado *cuerpo de prueba,* colocado en un punto próximo al Sol, será atraído según la recta que une los centros de ambos cuerpos. Así, las líneas de la figura 47 indican la dirección de las fuerzas atractivas del Sol correspondientes a distintas posiciones del cuerpo de prueba. La flecha dibujada sobre cada una de las líneas indica que la fuerza es atractiva, es decir, que está dirigida hacia el Sol. Estas rectas se llaman *líneas de fuerza del campo gravitatorio*. Por ahora esto es, simplemente, un nombre, y no existe razón para asignarle mayor importancia. Hay un detalle característico de esta representación que se señalará oportunamente: las líneas de fuerza están trazadas en el espacio vacío. Por el momento, el conjunto total de líneas de fuerza, o, más brevemente, el *campo*, indica, tan sólo, cómo se comportaría un cuerpo de prueba colocado en la proximidad de la esfera, campo que hemos, así, representado.

Las líneas del modelo espacial son siempre perpendiculares a la superficie de la esfera. Dado que esas líneas se reúnen en un punto, el centro de la esfera, es evidente que su densidad es mayor en la proximidad de ella y disminuye a medida que se alejan. Considerando zonas a distancias dobles, triples, etc., de la esfera, la densidad de las líneas en ellas en el modelo espacial, aunque no en nuestro dibujo, se hará cuatro, nueve, etc., veces menor, respectivamente. Luego las líneas de fuerza cumplen una función doble. Por una parte, indican la dirección de la fuerza que actúa sobre un cuerpo colocado en las inmediaciones de la esfera solar y, por otra, su densidad en el espacio señala la variación de la fuerza en relación con la distancia. La *representación gráfica del campo,* correctamente interpretada, indica, pues, la dirección de la fuerza de gravitación y su variación según la distancia. Esta representación objetiva de la ley de gravitación es tan clara como una buena descripción verbal o como el lenguaje preciso y económico de las matemáticas. La representación del campo, como la llamaremos, es clara e interesante, pero no hay razón alguna para creer que represente un progreso real. Resultaría muy difícil, pongamos por caso, probar su utilidad en el caso de la gravitación. Tal vez alguien encuentre útil considerar estas líneas como algo más que una representación, e imagine que las acciones de la fuerza de gravitación se efectúan realmente, mediante tales líneas. Esto puede hacerse, pero entonces la velocidad de dichas acciones a lo largo de las líneas de fuerza debe suponerse infinitamente grande. La fuerza entre dos cuerpos, según la ley de Newton, depende tan sólo de la distancia; el tiempo no interviene en su formulación. ¡La fuerza tiene, pues, que pasar instantáneamente de un cuerpo a otro! Pero

como un movimiento con velocidad de transmisión infinita no tiene significado para ninguna persona razonable, la tentativa de transformar nuestra representación en algo más que un modelo auxiliar, no conduce a nada.

No es nuestra intención, sin embargo, discutir ahora el problema de la gravitación. Nos sirvió sólo como introducción, simplificando la explicación de métodos semejantes de razonamiento de la teoría de la electricidad.

Empezaremos con un análisis del experimento que ha creado serias dificultades al punto de vista mecanicista. Recordemos que al establecer una corriente en un conductor circular, en cuyo centro se halla una aguja magnética, aparece una fuerza que actúa sobre el polo magnético perpendicularmente a la línea que une dicho polo con el conductor. Dicha fuerza, originada por una carga móvil, depende de su velocidad según el experimento de Rowland. Estos hechos experimentales contradicen la concepción filosófica según la cual todas las fuerzas debieran depender únicamente de la distancia y actuar en la línea de unión de las partículas entre las que se manifiestan.

La expresión exacta del modo de actuar de una corriente eléctrica sobre un polo magnético es, evidentemente, mucho más complicada que la ley de la gravitación. Sin embargo, es posible visualizar las acciones de dicha fuerza, como lo hicimos en el caso de la fuerza de gravitación Nuestro problema lo podemos formular así ¿con qué fuerza actúa la corriente eléctrica sobre un polo magnético colocado en su proximidad?

Resultaría más bien difícil describirla con palabras. Aun con una fórmula matemática, ello sería complicado Más difícil es representar todo lo que sabemos de esta fuerza en un gráfico, o más bien, en un modelo espacial de líneas de fuerza. Se encuentra cierta dificultad en ello por el hecho de que todo polo magnético existe siempre unido a otro, formando un dipolo. Es posible, no obstante, imaginar una aguja de longitud suficiente para que podamos considerar sólo la fuerza que actúa sobre el polo más próximo a la corriente. El otro polo lo consideramos bastante alejado para que la fuerza que actúa sobre él pueda no tomarse en cuenta. Para evitar ambigüedad, supondremos que el polo magnético colocado cerca del conductor es el *positivo*.

Las características de la fuerza que actúa sobre dicho polo se pueden deducir de la representación gráfica de la figura 48.

En esta figura las flechas dirigidas según el conductor indican el sentido de la corriente. Las curvas con flechas, dibujadas sobre el plano de la figura normal al plano del conductor, son las líneas de fuerza. Si las trazamos correctamente, nos dan la dirección del vector fuerza que representa la acción

de la corriente eléctrica sobre un polo magnético positivo dado, Suministrando, al mismo tiempo, una idea aproximada de su magnitud. Veamos, ahora, cómo se puede obtener de dicha representación la dirección y el sentido de la fuerza en cada punto del espacio.

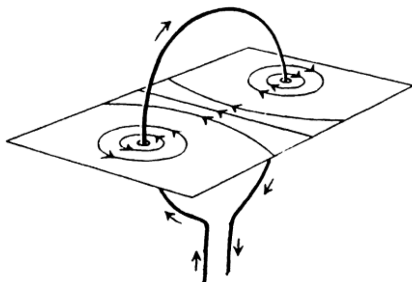


Fig. 48

La regla que nos permite establecer su dirección en el modelo en cuestión, es tan sencilla como la del ejemplo anterior donde las líneas de fuerza eran rectas. En la figura 49 está representada una sola línea de fuerza, con el objeto de hacer más clara la explicación de aquella regla. Consideremos un punto cualquiera de esta línea. El vector fuerza está sobre la tangente a ella en dicho punto, como se ve en la figura. La flecha que indica el sentido de esta fuerza y las flechas de la línea de fuerza están igualmente dirigidas. Queda determinada así la fuerza que actúa sobre el polo magnético, en dirección y sentido. Un gráfico bien hecho o un buen modelo nos dará asimismo una referencia de la longitud de dicho vector en cada punto: es más largo donde las líneas son más densas, es decir, cerca del conductor, y más corto en las regiones de menor densidad de dichas líneas, o sea al alejarnos de aquél.

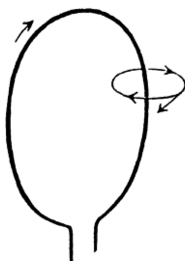


Fig. 49

De esta manera las líneas de fuerza, o, en otras palabras, el campo, nos permiten determinar las fuerzas que actúan sobre un polo magnético en cualquier punto del espacio. Esta es, por el momento, la única justificación de

nuestra compleja construcción del campo. Sabiendo lo que representa, examinemos con más detenimiento las líneas de fuerza del campo correspondiente a una corriente. Estas líneas son circunferencias que rodean al conductor y están sobre un plano perpendicular a él. La fuerza, como se ve en la figura, es tangente a las líneas de fuerza, resultando, de acuerdo con la experiencia, normal a toda recta que una al conductor con el polo, pues la tangente a una circunferencia es siempre perpendicular a su radio. Todo nuestro conocimiento de las fuerzas en cuestión queda así resumido en la construcción del campo correspondiente.

En otras palabras, situamos el concepto de campo entre el de corriente y el de polo magnético, con el objeto de representar de manera sencilla las fuerzas actuantes.

Toda corriente va acompañada de un campo magnético, es decir, que siempre se nota la acción de una fuerza sobre un polo magnético colocado cerca de un conductor por el cual circula una corriente eléctrica. Observemos, de paso, que esta propiedad nos permite la construcción de aparatos sensibles que indiquen la existencia de una corriente eléctrica.

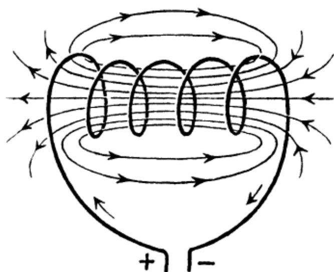


Fig. 50

Habiendo aprendido a inferir la naturaleza de las fuerzas magnéticas del modelo de campo, utilizaremos en adelante esta representación con el fin de visualizar la acción de esas fuerzas en las proximidades de cualquier conductor por el que circule una corriente eléctrica. Consideremos, por ejemplo, el caso de una corriente que circula por un solenoide, llamando así a un conductor en forma de espiral, como el de la figura 50. En esta figura se ve la estructura del campo de una corriente solenoidal, obtenido experimentalmente. Las líneas de fuerza son curvas cerradas que rodean al solenoide análogamente a las del campo magnético de una corriente circular.

El campo de una barra magnética puede representarse de la misma manera que el campo de una corriente. Las líneas de fuerza se trazan del polo positivo al negativo (fig. 51). El vector fuerza está siempre sobre la tangente a la línea

de fuerza y es más largo cerca de los polos porque la densidad de las líneas es máxima en estos puntos. El vector fuerza representa la acción del imán sobre un polo magnético positivo. En este caso la fuente del campo es el imán y no la corriente eléctrica.

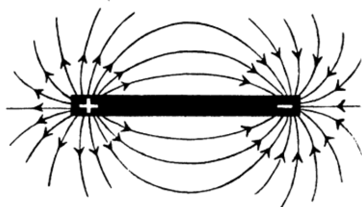


Fig. 51

Los gráficos de las figuras 50 y 51 deben ser comparados cuidadosamente. En el primero tenemos el campo magnético de una corriente en forma de solenoide; en el segundo, el campo de una barra imantada. Prescindamos del solenoide y del imán y observemos sólo los dos campos exteriores; se nota de inmediato que tienen exactamente el mismo carácter: las líneas de fuerza se dirigen, en ambos, de un extremo a otro del solenoide o de la barra imantada.

¡La representación del campo da aquí un primer fruto! Hubiera sido más bien difícil descubrir la gran similitud entre el campo de un solenoide y el de una barra magnética, si no nos fuera revelada por la construcción del campo.

El concepto de campo puede, ahora, exponerse a una prueba mucho más severa. En seguida veremos si es algo más que una nueva representación de las fuerzas actuantes. Podríamos razonar así: supongamos, por un momento, que el campo representa de una manera unívoca todas las acciones determinadas por su fuente. Esto es sólo una conjetura, cuyo significado en el caso que tratamos es que, si un solenoide y una barra imantada tienen un mismo campo, todas sus acciones deben, necesariamente, ser iguales. Ello significa, asimismo, que dos solenoides recorridos por corrientes eléctricas se comportarán como dos barras imantadas atrayéndose o repeliéndose con fuerzas que dependen, exactamente como en el caso de los imanes, de sus posiciones relativas. Debemos esperar, también que un solenoide y un imán se atraigan o repelan de la misma manera que dos imanes. En resumen, dicha suposición significa que todas las acciones de un solenoide recorrido por una corriente deben ser iguales a las de una barra magnética, ya que sus campos tienen la misma estructura. ¡La experiencia confirma plenamente nuestra conjetura!

¡Qué difícil hubiera sido llegar a estas conclusiones sin el concepto de campo! La expresión de la fuerza que actúa entre un conductor por el cual circula una corriente y un polo magnético es muy complicada. En el caso, por ejemplo, de dos solenoides recorridos por corrientes eléctricas, hubiéramos tenido que realizar una investigación especial para descubrir la forma como actúan entre sí. En cambio, con la ayuda del campo se puede predecir la forma de acción recíproca tan pronto se ha descubierto la similitud entre los campos respectivos.

Tenemos entonces el derecho de considerar el campo como algo mucho más importante de lo que lo consideramos al principio, las propiedades del campo resultan esenciales para la descripción de los fenómenos que estudiamos: sin importar las diferencias de origen. El concepto de campo revela su importancia al conducirnos al descubrimiento de nuevos hechos.

Este concepto resultó, pues, de gran utilidad. Nació como algo situado entre la fuente y la aguja magnética al tratar de describir la fuerza actuante. Se creyó que era un “agente” de la corriente, mediante el cual ésta transmitía su acción. Pero ahora resulta que el agente actúa como un intérprete, que traduce las leyes a un lenguaje claro y sencillo, fácilmente comprensible.

Este primer éxito de la descripción por intermedio del campo sugiere la conveniencia de considerar indirectamente todas las acciones de imanes, corrientes y cargas eléctricas, es decir, valiéndonos del campo como intérprete. Un campo magnético puede ser considerado como algo que siempre va asociado a una corriente eléctrica. Existe aún en ausencia de un polo magnético que ponga de manifiesto su existencia. Tratemos de desarrollar esta nueva idea de un modo consecuente.

El campo de un conductor cargado puede establecerse de manera análoga a la del campo gravitatorio o a la del de una corriente o el de un imán. Consideremos, otra vez, el caso más simple. Para trazar el campo de una esfera cargada positivamente tenemos que preguntarnos qué clase de fuerzas actúan sobre una pequeña carga positiva que se coloca en la proximidad de la fuente del campo, o sea de la esfera. El hecho de usar un cuerpo de prueba con una carga positiva y no una negativa es cuestión puramente convencional, que nos permite establecer el sentido de las líneas de fuerza, indicado en el diagrama por las flechas dibujadas sobre cada una de dichas líneas. El modelo así obtenido es análogo al del campo gravitatorio representado en la figura 47.

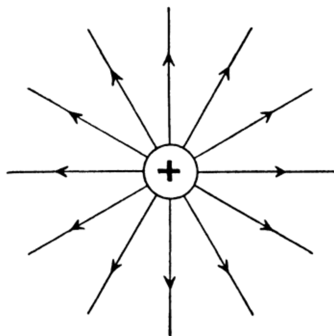


Fig. 52

A causa de la similitud entre la ley de Coulomb y la ley de Newton, la única diferencia entre ambas representaciones consiste en que las flechas apuntan en direcciones opuestas (v. fig. 52), consecuencia, claro está, del hecho de que dos cargas positivas se repelen mientras que dos masas siempre se atraen. Sin embargo, el campo de una esfera con carga negativa será idéntico al campo gravitatorio, pues la pequeña carga positiva de prueba será atraída por la fuente del campo, lo que se representa en la figura 53, que es idéntica a la citada 47.

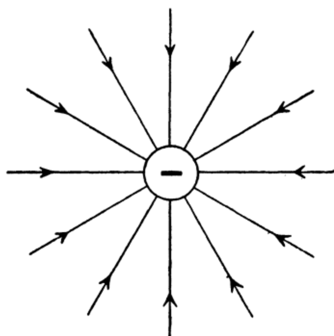


Fig. 53

Si la carga eléctrica y los polos magnéticos están en reposo, no se manifiesta acción alguna entre ellos; es decir, no se atraen ni se repelen. Expresando el mismo hecho por medio del concepto de campo, podemos decir: un campo electrostático no influye sobre un campo magnetostático, y recíprocamente. Las palabras "campo estático" significan un campo que no varía con el tiempo. Los imanes y las cargas eléctricas quedarían en reposo, los unos en la proximidad de las otras, eternamente, si no actuaran fuerzas exteriores

sobre ellos. Los campos electrostático, magnetostático y gravitatorio son de distinta naturaleza. No se mezclan; cada uno conserva su individualidad aun en presencia de los otros.

Volvamos a la esfera eléctrica que estaba en reposo y supongamos que comienza a moverse por la acción de cierta fuerza externa. En el lenguaje del campo, este hecho se expresa así: el campo de la carga eléctrica varía con el tiempo. Pero una esfera cargada en movimiento es, como ya sabemos por la investigación de Rowland, equivalente a una corriente. Además, toda corriente va acompañada de un campo magnético. Luego, el encadenamiento de nuestro razonamiento es:

carga en movimiento → variación del campo eléctrico



corriente → campo magnético asociado.

De acuerdo con lo que antecede deducimos que *la variación de un campo eléctrico producida por el desplazamiento de una carga eléctrica va siempre acompañada por un campo magnético*.

Esta conclusión se basa en el experimento de Oersted, pero implica mucho más. Sugiere el reconocimiento de que la asociación de un campo eléctrico variable en el tiempo con un campo magnético es esencial para el desarrollo ulterior de nuestro tema.

Mientras una carga eléctrica está en reposo, existe sólo un campo electrostático; pero aparece un campo magnético apenas la carga empieza a moverse. Se puede afirmar más aún: el campo magnético creado por el movimiento de una carga eléctrica será más intenso si la carga es mayor y si se desplaza más rápidamente. Esto es también una consecuencia, ya citada, del trabajo de Rowland. Una vez más recurriendo al lenguaje del campo podemos decir: cuanto más rápida sea la variación del campo eléctrico, tanto más intenso será el campo magnético engendrado.

Hemos tratado aquí de traducir hechos comunes, del lenguaje de los fluidos eléctricos ideados según el viejo punto de vista mecanicista al nuevo lenguaje del campo. Más adelante veremos qué claro, instructivo y de largo alcance es este nuevo lenguaje.

"La variación de un campo eléctrico crea un campo magnético." Si intercambiamos las palabras "magnético" y "eléctrico", esta afirmación se transforma en la siguiente: "La variación de un campo magnético crea un campo eléctrico." Sólo el experimento puede decidir si esto último es cierto o no. La idea de formular este problema es sugerida por el uso del lenguaje del campo.

Hace precisamente cien años que Faraday llevó a cabo un experimento que lo condujo al gran descubrimiento de las corrientes inducidas.

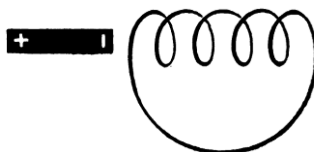


Fig. 54

La demostración de su producción es sencilla. Necesitamos para ello, solamente, un solenoide o algún otro circuito, una barra imantada y uno de los muchos tipos de aparatos indicadores de corriente eléctrica. Para empezar supongamos en reposo la barra imantada colocada en la proximidad del solenoide que forma un circuito cerrado, como se representa en la figura 54. Por el solenoide no circula corriente alguna, pues no hay ninguna fuente. Existe solamente el campo magnetostático de la barra imantada. Ahora acerquemos o alejemos rápidamente el imán del solenoide. Se nota, al instante, la aparición en el solenoide, de una corriente de corta duración. Y otra vez que la posición del imán varíe, reaparecerá la corriente, como puede demostrarse con un aparato suficientemente sensible. Pero una corriente desde el punto de vista de la teoría del campo, significa la existencia de un campo eléctrico que fuerza el desplazamiento de la electricidad a través del conductor. La corriente —y por lo tanto también, el campo eléctrico— desaparece cuando el imán vuelve al estado de reposo. Imaginemos, por un momento, no tener la noción de campo y tratemos de describir cualitativa y cuantitativamente los resultados del experimento de Faraday con los conceptos mecánicos anteriores a la introducción de aquél. Dicho experimento muestra que por el movimiento de un dipolo magnético se crea una nueva fuerza que hace desplazar los fluidos eléctricos en el conductor. La segunda cuestión sería ésta: ¿de qué depende esta fuerza? Para poder responder a esta pregunta tendríamos que investigar su dependencia respecto de la velocidad y de la forma del imán, así como de la forma de circuito. Además, este experimento, interpretado con

el lenguaje mecanicista, no da ningún indicio sobre si una corriente inducida puede ser originada por el movimiento de otro circuito por el cual circula una corriente eléctrica, en lugar de ser originada por el movimiento de una barra imantada.

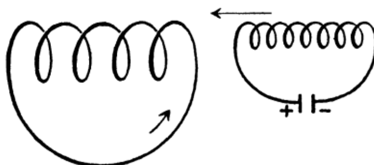


Fig. 55

El asunto cambia de aspecto si nos valemos del concepto del campo y confiamos, una vez más, en el principio de que la fuerza está exclusivamente determinada por aquél. Se ve así, en el acto, que un solenoide por el cual circula una corriente producirá el mismo efecto que una barra imantada. En la figura 55 se ven dos solenoides, uno pequeño a través del cual circula una corriente, y otro mayor, en el cual se evidenciará la corriente inducida al mover el primero, como efectivamente se puede comprobar. Por otro lado, en lugar de desplazar dicho solenoide, se puede crear y anular el campo magnético al crear y anular la corriente, esto es, al cerrar y abrir el circuito eléctrico de dicho campo. Una vez más, nuevos hechos sugeridos por la teoría del campo resultan confirmados por la experiencia.

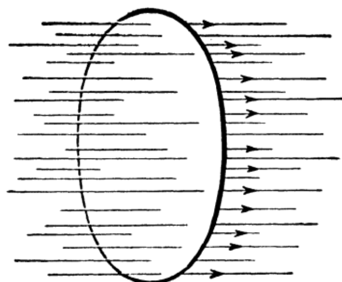


Fig. 56

Consideremos un ejemplo sencillo. Supongamos un conductor cerrado y un campo magnético en su vecindad. No nos interesa saber si el origen de este campo magnético es un circuito eléctrico o un imán. La figura 56 muestra el circuito supuesto y las líneas de fuerza magnética. La descripción cualitativa y cuantitativa de los fenómenos de inducción es sencilla en el lenguaje del campo. Como se ve en la figura, algunas de las líneas de fuerza pasan por la superficie que limita al conductor. Las líneas de fuerza que debemos tener

en cuenta son las que cortan la superficie enmarcada por el conductor. Cualquiera que sea la intensidad del campo magnético, no habrá manifestación de corriente inducida en tanto aquél no experimente alguna variación. Pero, apenas varía el número de líneas de fuerza que atraviesan la superficie considerada, se manifiesta, en seguida, una corriente inducida en el conductor que enmarca dicha superficie. La corriente se establece, pues, por el cambio del número de líneas de fuerza que cortan aquella superficie, independientemente de la causa de la variación de dicho número. Este cambio del número de líneas de fuerza es el único concepto esencial para la descripción cualitativa y cuantitativa de la corriente inducida. "El número de líneas cambia" quiere decir que la densidad de las líneas varía y esto, recordemos, significa que la intensidad del campo se modifica.

Los puntos principales de la ilación de nuestro razonamiento son, pues, éstos:

variación del campo magnético → corriente inducida → desplazamiento de carga → existencia de un campo eléctrico.

Luego: *la variación de un campo magnético va acompañada por un campo eléctrico*.

Hemos encontrado, así, los dos pilares más importantes sobre los cuales se apoya la teoría de los campos eléctricos y magnéticos.

Constituye el primer pilar la relación que existe entre un campo eléctrico variable y el campo magnético, la cual tiene su origen en el experimento de Oersted sobre la desviación de una aguja magnética por una corriente eléctrica y que condujo a la conclusión: *la variación de un campo eléctrico va acompañada por un campo magnético*.

El segundo pilar es la relación que existe entre un campo magnético variable y una corriente inducida, de acuerdo con la experiencia de Faraday. Entre los dos dieron el fundamento para la formulación cuantitativa de la teoría que nos ocupa.

El campo eléctrico que acompaña a un campo magnético variable aparece como algo real. Ya tuvimos que suponer la existencia del campo magnético de una corriente, en ausencia del polo de prueba. Igualmente debemos sostener, aquí, la existencia del campo eléctrico, aun en ausencia del conductor que nos sirvió para poner de manifiesto la corriente inducida. De hecho los dos pilares que han servido para estructurar nuestra teoría pueden reducirse a uno: el que se basa en el experimento de Oersted. En efecto, el resultado del

experimento de Faraday puede inferirse del de Oersted y del principio de conservación de la energía. Se usa la estructuración basada en los dos pilares porque es más clara y económica.

Hemos de mencionar, a continuación, otra consecuencia que resulta de la concepción del campo. Supongamos un circuito por el cual circula una corriente eléctrica que tiene como fuente, por ejemplo, una pila voltaica. Cortemos rápidamente la conexión entre el circuito y la batería. Hemos anulado, con ello, la corriente. Pero, durante el corto tiempo que dura el proceso de interrupción, se produce otro proceso complicado que pudo haberse previsto con la teoría del campo. En efecto, antes de la interrupción de la corriente existía un campo magnético en la proximidad del conductor, que desapareció al anularse la corriente. En otras palabras, interrumpiendo una corriente hemos hecho desaparecer un campo magnético. El número de líneas de fuerza que atravesaban la superficie que limita el conductor cerrado cambia, en consecuencia, rápidamente. Pero tal variación, cualquiera que sea la forma de producirla, debe crear una corriente inducida. Como lo que en realidad importa es la magnitud del cambio, cuanto más rápido sea éste, más intensa ha de ser la corriente inducida. Esta consecuencia es otra prueba para la teoría. La interrupción de una corriente (apertura del circuito) debe ir acompañada por la aparición de una corriente inducida momentánea e intensa. La experiencia confirma de nuevo esta predicción. Quien haya interrumpido alguna vez una corriente eléctrica, habrá notado, probablemente, la aparición de una chispa o un arco. Esto revela la aparición de una gran diferencia de potencial, causada por el cambio rápido del campo magnético.

El mismo proceso puede interpretarse desde un punto de vista distinto, el de la energía. En efecto, desapareció un campo magnético y apareció una chispa. Una chispa representa energía; luego, también el campo magnético representa energía.

Para ser consecuentes con el concepto de campo magnético debemos considerarlo como un depósito de energía. Sólo así podremos describir los fenómenos eléctricos y magnéticos de acuerdo con el principio de la conservación de la energía.

Empleado al principio como una representación auxiliar, el campo se ha hecho cada vez más real. Nos ayudó a explicar fenómenos conocidos y nos condujo al descubrimiento de nuevos hechos. El atribuirle energía al campo ha significado un progreso importante en la evolución de la física que al mismo tiempo que extendía, cada vez más, el concepto de campo, dejaba de lado los de Sustancia, tan esenciales a la interpretación mecanicista.

La descripción cuantitativa, matemática, de las leyes del campo esta sintetizada en las llamadas ecuaciones de Maxwell. Los hechos hasta ahora citados condujeron a la obtención de estas ecuaciones, pero su contenido es mucho más rico. Su forma simple disimula su profundidad revelada sólo tras un estudio cuidadoso.

La formulación de estas ecuaciones es el acontecimiento más importante de la física desde el tiempo de Newton, no sólo por la riqueza de su contenido, sino porque representan un modelo o patrón para un nuevo tipo de ley.

Lo típico de las ecuaciones de Maxwell, común a todas las otras ecuaciones de la física moderna, se resume en una frase: Las ecuaciones de Maxwell son leyes que representan la *estructura* del campo.

¿Por qué difieren las ecuaciones de Maxwell, en forma y carácter, de las ecuaciones de la mecánica clásica? ¿Qué quiere decir que estas ecuaciones describen la estructura del campo? ¿Cómo es posible que de los resultados de las experiencias de Oersted y Faraday podamos formular un nuevo tipo de ley, que resulte tan importante para el desarrollo ulterior de la física?

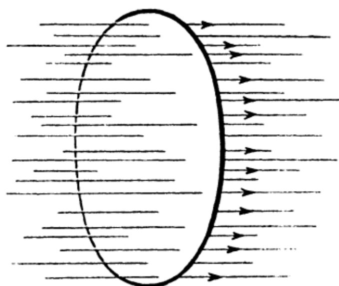


Fig. 57

Hemos visto ya, según la experiencia de Oersted, cómo alrededor de un campo eléctrico variable se enrolla un campo magnético. Hemos visto, también, según la experiencia de Faraday, cómo alrededor de un campo magnético variable se enrosca un campo eléctrico. Para dar una idea de algunos de los rasgos característicos de la teoría de Maxwell, fijemos momentáneamente nuestra atención en una de dichas experiencias; sea ésta, la de Faraday. En la figura 57 repetimos el esquema correspondiente a una corriente inducida por un campo magnético variable. Ya sabemos que aparece una corriente inducida cuando varía el número de líneas de fuerza que pasan por la superficie limitada por el conductor. Es decir, aparecerá tal corriente si varía el campo

magnético o si se deforma o se desplaza el circuito, o dicho de otra manera, si el número de líneas de fuerza que atraviesan la superficie se modifica, sin importar la manera como se ha originado esa modificación. Tener en cuenta todas esas posibilidades y sus influencias específicas nos llevaría necesariamente a una teoría muy complicada. ¿Será posible simplificar el problema?

Tratemos de eliminar de nuestras consideraciones toda referencia a las características del circuito, como su forma, su longitud o la superficie que abarca el conductor. Imaginemos que el circuito de nuestra última figura disminuye gradualmente de tamaño hasta convertirse en un circuito pequeñísimo que encierra un punto del espacio. En este caso todo lo concerniente a forma y tamaño del mismo pierde importancia para nuestras consideraciones y obtenemos en el límite leyes que relacionan, en un instante dado, las variaciones de un campo magnético y de un campo eléctrico, en un punto arbitrario del espacio.

Este es uno de los pasos fundamentales que conducen a las ecuaciones de Maxwell. Se trata, otra vez, de un experimento ideal que consiste en repetir con la imaginación la experiencia de Faraday, con un circuito que reduce gradualmente su tamaño hasta convertirse en un punto. Debiéramos llamarlo, sin embargo, medio paso, más bien que un paso entero. En efecto, hasta ahora nos hemos fijado tan sólo en la experiencia de Faraday, pero el otro pilar de la teoría del campo, basado en la experiencia de Oersted, debe también ser tenido en cuenta. En esta experiencia las líneas magnéticas se enroscan alrededor de la corriente. Reduciendo a un punto las líneas circulares de fuerza magnética, damos la segunda mitad del paso; el paso completo conduce, entonces, a una relación entre las variaciones de los campos magnéticos y eléctricos, en un punto arbitrario del espacio y en un instante cualquiera del tiempo.

Es necesario dar aún otro paso esencial. Según la experiencia de Faraday, tiene que haber un conductor que revele la existencia del campo eléctrico, igual que resulta indispensable la presencia de un polo o de una aguja magnética para probar la existencia del campo magnético en la experiencia de Oersted. La nueva concepción teórica de Maxwell va más allá de los resultados de dichos experimentos. El campo eléctrico y magnético, o, en una palabra, el campo electromagnético es, en la teoría de Maxwell, algo real. El campo eléctrico es creado por un campo magnético variable independientemente de la existencia de un conductor, y se crea un campo magnético por un campo eléctrico variable, haya o no un polo magnético.

En resumen, los dos pasos esenciales que conducen a la formulación de las leyes de Maxwell son: el primero, considerar que las líneas de fuerza del campo magnético que envuelven a la corriente y al campo eléctrico variables en las experiencias de Oersted y Rowland, se achican hasta reducirse a un punto, y que en la experiencia de Faraday, las líneas circulares del campo eléctrico, que envuelven al campo magnético variable, se han reducido también a un punto. El segundo consiste en la concepción del campo como algo real; el campo electromagnético una vez creado existe, actúa y varía según las leyes de Maxwell. Concluyendo, repetimos que las ecuaciones de Maxwell describen la estructura del campo electromagnético; su validez se extiende a todo el espacio contrariamente a las leyes de tipo mecánico, que valen tan sólo para aquellos lugares donde haya materia o cargas eléctricas o magnéticas.

Recordemos que en la mecánica, conociendo la posición y la velocidad de una partícula en un instante dado y las fuerzas actuantes, se puede calcular de antemano toda la trayectoria que describirá en el futuro dicha partícula. En la teoría de Maxwell, si conocemos el campo en un solo instante, se puede deducir de las ecuaciones de la teoría cómo variará todo el campo, en el espacio y el tiempo. Las ecuaciones de Maxwell nos permiten seguir la historia del campo, al igual que las ecuaciones de la mecánica nos permiten seguir la historia de las partículas materiales.

Hay otra diferencia esencial entre las leyes de la mecánica y las leyes de Maxwell. Una comparación entre la ley de la gravitación de Newton y las leyes del campo de Maxwell hará resaltar algunos de los caracteres distintivos de estas últimas.

Con la ayuda de las leyes de la mecánica, y teniendo en cuenta la fuerza que actúa entre el Sol y la Tierra, se puede deducir la forma del movimiento de ésta alrededor del primero. Las leyes de la mecánica relacionan el movimiento de la Tierra con la acción del lejano Sol. El Sol y la Tierra, aunque tan distantes entre sí, son los dos actores en el juego de las fuerzas.

En la teoría de Maxwell no hay actores materiales. Las ecuaciones matemáticas de esta teoría expresan las leyes que rigen el campo electromagnético. No relacionan, como las leyes de Newton, dos sucesos distantes; no reconocen la "*acción a distancia*". El campo "*aquí*" y "*ahora*" depende del campo que había en el *entorno inmediato* en un instante *inmediatamente anterior*. Las ecuaciones permiten predecir lo que pasará un poco más allá de un cierto lugar del espacio, un instante después, si conocemos lo que pasa "ahora" y "aquí". Estas ecuaciones permiten ampliar nuestro conocimiento

del campo paso a paso, relacionando así, por un gran número de pequeños pasos, fenómenos distantes ocurridos en tiempos distintos. En cambio, en la teoría de Newton, la relación entre sucesos distantes, se efectúa mediante pocos y grandes saltos. Los resultados de las experiencias de Faraday y Oersted pueden ser deducidos de las ecuaciones de Maxwell, pero tan sólo por la suma o reunión de pequeños pasos o efectos a lo largo del conductor, cada uno de los cuales está determinado por las leyes electromagnéticas.

Un estudio matemático cuidadoso de las ecuaciones de Maxwell muestra que es posible sacar de ellas conclusiones nuevas y realmente inesperadas; estas conclusiones, a las que se llega por todo un encadenamiento lógico, son de carácter cuantitativo y permiten someter toda la teoría a una prueba decisiva.

Imaginemos nuevamente un experimento ideal. Una pequeña esfera cargada eléctricamente es forzada por cierta influencia exterior a oscilar rápida y rítmicamente como un péndulo. Teniendo en cuenta nuestro conocimiento de las variaciones del campo, ¿qué es lo que pasará y cómo lo describiremos en el lenguaje del campo? La oscilación de la carga produce un campo eléctrico variable. Este viene siempre acompañado por un campo magnético variable. Si se coloca en su proximidad un conductor que forma un circuito cerrado, entonces el campo magnético variable inducirá en éste una corriente eléctrica. Todo esto es sencillamente la repetición de hechos conocidos, pero el estudio de las ecuaciones de Maxwell da una comprensión más profunda del problema de la carga eléctrica oscilante. Por deducciones matemáticas de las ecuaciones de Maxwell podemos llegar al conocimiento del carácter del campo que envuelve a la carga oscilante, su estructura y su variación con el tiempo. El resultado de tal deducción es la *onda electromagnética*. La energía irradiada por la carga oscilante viaja por el espacio con una velocidad definida; pero una transferencia de energía, es decir, el desplazamiento de un estado del medio, es característico a todos los fenómenos ondulatorios.

Hemos considerado ya distintos tipos de ondas: la onda longitudinal, causada por una esfera pulsante, que consiste en la propagación de variaciones de densidad a través del medio, y la onda transversal, que se propaga en un medio tipo gelatina, como una deformación causada por la rotación de la esfera en su seno. ¿Qué clase de variaciones son las que se propagan en el caso de la onda electromagnética? ¡Variaciones del campo electromagnético! En efecto, todo cambio de un campo eléctrico produce un campo magnético; toda variación de este último origina un campo eléctrico; y así sucesivamente.

Como el campo representa energía, estas variaciones, al propagarse en el espacio con una velocidad determinada, producen una onda. Las líneas de fuerza eléctrica y magnética están siempre, según se deduce de la teoría, en planos perpendiculares a la dirección de propagación. La onda producida es, pues, transversal. Las características originales de la imagen del campo que nos formamos a partir de los experimentos de Oersted y Faraday son aún valederas, pero ahora vemos que esa imagen tiene un significado más profundo.

La onda electromagnética se desplaza en el vacío. Esto es también una consecuencia de la teoría. Si la carga oscilante cesa repentinamente en su movimiento, entonces su campo se hace electrostático. Pero la serie de ondas, creadas por la oscilación, continúa propagándose. Las ondas tienen una existencia independiente y la historia de sus variaciones puede ser seguida exactamente como la de cualquier objeto material.

Se comprende que nuestra imagen de una onda electromagnética, desplazándose con una cierta velocidad en el espacio y variando en el tiempo, es una consecuencia de las ecuaciones de Maxwell, pues éstas describen la estructura del campo electromagnético en todo punto del espacio y en todo instante.

Hay otro problema muy importante. ¿Con qué velocidad se propaga la onda electromagnética en el vacío? La teoría, con la ayuda de los datos de ciertas experiencias sencillas, que no tienen nada que ver en la propagación de las ondas, da una contestación precisa: *la velocidad de una onda electromagnética es igual a la velocidad de la luz.*

Las experiencias de Oersted y Faraday constituyeron la base sobre la cual se edificaron las leyes de Maxwell. Todos los resultados obtenidos hasta el presente proceden del estudio cuidadoso de estas leyes, expresadas en el lenguaje del campo. El descubrimiento teórico de las ondas electromagnéticas, que se propagan con velocidad de la luz, es uno de los mayores logros de la historia de la ciencia.

La experiencia ha confirmado la predicción de la teoría. Hace unos cien años probó Hertz, por primera vez, la existencia de ondas electromagnéticas y confirmó, experimentalmente, que su velocidad es igual a la de la luz. Actualmente, con la generalización de la radiotelefonía, millones de personas comprueban la emisión y recepción de ondas electromagnéticas. Sus aparatos que detectan la presencia de ondas, a miles de kilómetros de las fuentes emisoras, son mucho más complicados que los usados por Hertz, que tan sólo denotaban la existencia de ondas a pocos metros de la fuente.

La onda electromagnética es transversal y se propaga con la velocidad de la luz en el vacío. El hecho de la igualdad de esas velocidades sugiere la existencia de una estrecha relación entre los fenómenos electromagnéticos y la óptica.

Cuando tuvimos que elegir entre la teoría corpuscular y la teoría ondulatoria nos decidimos en favor de esta última. La difracción de la luz fue el argumento más poderoso para tomar esta decisión. No contradecimos ninguna de las explicaciones de los hechos ópticos suponiendo que *la onda luminosa es una onda electromagnética*. Por el contrario, se pueden deducir aún otras conclusiones adoptando esta hipótesis. Si esto es así, debe existir cierta conexión entre las propiedades ópticas y eléctricas de la materia, que puede ser deducida de la teoría. El hecho de que conclusiones de este tipo hayan podido realmente ser deducidas y que hayan sido confirmadas por la experiencia es una razón de peso en favor de la teoría electromagnética de la luz.

Esta consecuencia importante se debe a la teoría del campo. Dos ramas de la ciencia aparentemente sin relación son abarcadas Por una misma teoría. Las mismas ecuaciones de Maxwell contienen la descripción de la inducción electromagnética y de la refracción óptica. Si el objeto de la ciencia es explicar todos los fenómenos acaecidos o que puedan ocurrir con la ayuda de una teoría, entonces la fusión de la óptica y de la Electricidad es indudablemente un gran paso hacia delante. Desde el punto de vista físico, la única interferencia entre una onda electromagnética común y una onda luminosa está en su longitud de onda: ésta es muy pequeña para las Ondas luminosas y grande para las ondas electromagnéticas ordinarias.

El clásico punto de vista mecanicista trataba de reducir todos los sucesos de la naturaleza a fuerzas que actuaban entre partículas materiales. En este punto de vista mecanicista se basaba la primera e ingenua teoría de los fluidos eléctricos. El campo no existía para el físico de principios del siglo XIX. Para él, tan sólo la sustancia y sus cambios eran lo real. Trató de describir la acción de dos cargas eléctricas sólo con la ayuda de conceptos que se referían directamente a esas dos cargas. El concepto de campo fue, en un principio, sólo un medio para facilitar la explicación de los fenómenos eléctricos desde un punto de vista mecánico. En el nuevo lenguaje del campo, es la descripción del campo entre las cargas, y no las cargas mismas, lo esencial para compren-

der la acción de las últimas. El valor de los nuevos conceptos se elevó gradualmente, llegando el campo a adquirir primacía sobre la sustancia. Se comprendió que algo de trascendental importancia se había producido en la Física. Una nueva realidad fue creada, un concepto nuevo para el cual no había lugar en la descripción mecanicista. Lentamente, y a través de una verdadera lucha, el concepto de campo alcanzó un lugar de privilegio en la Física y ha continuado siendo uno de los conceptos básicos de la misma. El campo electromagnético es para el físico moderno tan real como la silla sobre la cual se sienta.

Sería falso considerar que el nuevo punto de vista del campo Libro a la ciencia de los errores de la teoría anterior de los fluidos eléctricos y que la nueva teoría destruye las adquisiciones de la teoría abandonada. La teoría nueva muestra tanto los méritos como las limitaciones de la anterior, y nos permite reconsiderar los viejos conceptos desde un nivel más elevado. Esto es cierto no solamente para las teorías de los fluidos eléctricos y del campo, sino también para todos los casos en que se modifiquen las teorías físicas, por más revolucionarias que parezcan estas modificaciones. En nuestro caso todavía encontramos el concepto de carga eléctrica en la teoría de Maxwell, a pesar de que la carga es aquí considerada únicamente como fuente del campo eléctrico. La ley de Coulomb es válida y está contenida en las ecuaciones de Maxwell, de las que puede ser deducida como una de tantas consecuencias. Podemos aplicar aún la vieja teoría cuando son investigados hechos que caen en la región de su validez, sin olvidar que también estos fenómenos son interpretados por la teoría nueva.

Buscando un símil no podríamos decir que crear una nueva teoría es algo análogo a echar abajo una casucha y erigir en su lugar un rascacielos. Es más bien algo parecido a escalar una montaña ganando nuevos y más amplios horizontes, descubriendo senderos inesperados entre nuestro punto de partida y sus hermosos alrededores. Pero el punto de partida sigue existiendo y puede ser observado, aunque aparece más pequeño, formando una parte reducida de nuestro amplio paisaje, adquirido venciendo los poderosos obstáculos encontrados en nuestra aventurera ascensión.

Pasó ciertamente un tiempo largo hasta que fue valorado todo el contenido de la teoría de Maxwell. Al principio se consideró el campo como algo que pudiera más tarde ser interpretado mecánicamente, con la ayuda del éter. Con el pasar del tiempo se vio que esto no era posible; las adquisiciones de la teoría del campo alcanzaron una importancia demasiado grande como para abandonarla por el dogma mecanicista. Por otra parte, el problema de idear

un modelo mecánico del éter resultó cada vez más descorazonador a causa de la necesidad de aceptar, en los distintos intentos de solucionarlo, suposiciones forzadas y artificiosas.

Nuestra única salida parece ser la de dar por sentado el hecho de que el espacio tiene la propiedad física de transmitir ondas electromagnéticas y no preocuparnos demasiado del significado de esta afirmación. Podemos aún usar la palabra éter, pero sólo para expresar esta propiedad del espacio. El vocablo éter ha cambiado muchas veces de significado durante el desarrollo de la Ciencia; ya no representa un medio formado por partículas. Su historia, de ninguna manera terminada, se continúa en la teoría de la relatividad.

EL ANDAMIAJE MECÁNICO

Al llegar a este punto de nuestra exposición debemos volver al principio de inercia de Galileo.

«Todo cuerpo permanece en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo, a menos que obren sobre él fuerzas exteriores que le obliguen a modificarlo.»

Entendida la idea de inercia, uno se pregunta: ¿qué más puede decirse al respecto? Aun cuando este problema ha sido ya discutido cuidadosamente no está agotado en modo alguno.

Imaginemos a un científico serio que cree que el principio de inercia puede ser comprobado experimentalmente. Con tal objeto impulsa pequeñas esferas sobre un plano horizontal, tratando en lo posible de eliminar el rozamiento, y nota que el movimiento se hace más uniforme a medida que la mesa y las esferas se hacen más pulidas. En el preciso momento en que está por proclamar el principio de inercia alguien resuelve usarle una broma pesada.

Nuestro físico trabaja en un laboratorio sin ventanas y sin comunicación alguna con el exterior. El bromista instala un mecanismo que puede hacer girar la sala de trabajo alrededor de un eje que pasa por su centro. Apenas comienza la rotación el físico adquiere nuevas e inesperadas experiencias. Las esferas que tenían un movimiento uniforme empiezan repentinamente a alejarse del centro de la sala. El mismo físico siente una fuerza extraña que lo empuja hacia la pared, es decir, experimenta la misma sensación que tenemos al describir rápidamente una curva, viajando en tren o en coche, o cuando

estamos montados en un tiovivo. Todos sus resultados anteriores se desmoronan por completo.

Nuestro físico tendrá que descartar, junto con el principio de inercia, todas las leyes mecánicas. El principio de inercia era su punto de partida; si éste no vale, tampoco valdrán todas las conclusiones posteriores. Un observador, recluido toda su vida en la sala giratoria, y obligado por lo tanto a realizar en ella todas sus experiencias, llegaría a leyes de la mecánica diferentes de las nuestras. Si, por otra parte, entra en el laboratorio con un profundo conocimiento y una firme creencia en los principios de la Física, su explicación de la aparente bancarrota de las leyes de la mecánica se basará en la suposición de que la habitación gira. Con experiencias mecánicas apropiadas el investigador podría determinar, inclusive, cómo gira la sala.

¿Por qué nos interesamos tanto por el observador en su laboratorio giratorio? Sencillamente porque nosotros, en nuestra Tierra, estamos en cierto sentido en las mismas condiciones. Desde el tiempo de Copérnico sabemos que la Tierra gira sobre su eje en su movimiento alrededor del Sol. Aun cuando esta simple idea, tan clara para todo el mundo, no haya permanecido intacta durante el progreso de la ciencia, dejémosla por ahora y aceptemos el punto de vista de Copérnico. Si nuestro observador en la sala giratoria no pudo confirmar las leyes de la mecánica, debiera pasarnos lo mismo a nosotros, sobre la Tierra; pero la rotación de la Tierra es comparativamente lenta, por lo cual el efecto no es muy pronunciado. No obstante, hay varios hechos que indican una pequeña desviación de las leyes de la mecánica, y la concordancia de estas discrepancias entre sí puede ser considerada precisamente como una prueba de la rotación de la Tierra.

Desafortunadamente, es imposible colocarnos entre la Tierra y el Sol, para probar la validez exacta del principio de inercia y tener una visión de la rotación de la Tierra. Esto se puede realizar únicamente en la imaginación. Todas nuestras experiencias tienen que ser realizadas sobre la Tierra.[3] Este hecho se expresa a menudo más científicamente diciendo: *la Tierra es nuestro sistema de coordenadas.*

Para ver más claramente el significado de estas palabras, tomemos un ejemplo sencillo. Teniendo en cuenta las leyes de la caída de los cuerpos se puede predecir la posición, en cualquier instante, de una piedra arrojada desde una torre y confirmar esa predicción experimentalmente. Si se coloca al lado

---

[3] Esto ya no es tan cierto en la actualidad, después de que se ha visitado la Luna y se han enviado sondas espaciales a otros astros del sistema solar.

de la torre una escala métrica es posible, de acuerdo al párrafo anterior, predecir con qué punto de la escala coincidirá el cuerpo, en cualquier instante de su caída. La torre y la escala no deben estar hechas, evidentemente, de goma o de ningún otro material que pueda sufrir variaciones durante la experiencia. En realidad, todo lo que necesitamos, en principio, para realizar nuestra experiencia, es una escala perfectamente rígida y un buen reloj. En posesión de estos elementos podemos ignorar, no sólo la arquitectura de la torre, sino hasta su presencia. Las condiciones citadas son triviales y no se encuentran especificadas usualmente en las descripciones de tales experiencias. Este análisis nos muestra cuántas suposiciones implícitas subyacen a la más simple de nuestras afirmaciones. En el presente ejemplo suponíamos la existencia de una barra rígida y de un reloj ideal, sin los cuales sería imposible comprobar la ley de Galileo de la caída de los cuerpos. Con estos aparatos físicos, simples pero fundamentales, una barra y un reloj, nos es posible confirmar esta ley mecánica con cierto grado de exactitud. Verificada cuidadosamente, revela discrepancias entre la teoría y la experiencia debido a la rotación de la Tierra o, en otras palabras, a causa de que las leyes de la mecánica, tal como han sido formuladas aquí, no son estrictamente válidas en un sistema de coordenadas rígidamente unido a la Tierra.

En todos los experimentos mecánicos debemos determinar las posiciones de puntos materiales en un cierto instante, exactamente como en la experiencia anterior de un cuerpo que cae. La posición debe ser determinada, siempre, con respecto a algo, que en el caso anterior era la torre y la escala. Es decir, para poder determinar la posición de los cuerpos, debemos tener lo que se llama un *sistema o marco de referencia*, una especie de red o andamiaje mecánico, respecto al que se toman las distancias respectivas. Al describir las posiciones de objetos y personas en una ciudad, las calles y avenidas forman dicha red o sistema de referencia. Hasta el presente no nos habíamos preocupado de la descripción del sistema de referencia al hablar de las leyes de la mecánica porque tenemos la suerte de que sobre la Tierra no hay dificultad alguna de encontrar un sistema apropiado de referencia, en cada caso particular. Dicha red o andamiaje construido de material rígido e invariable, al cual referimos todas nuestras observaciones, se denomina *sistema de coordenadas*. Esta expresión deberá ser usada muy a menudo, por lo cual emplearemos la siguiente abreviatura: SC.

De todo lo que acabamos de exponer resulta que todos los enunciados físicos que hemos presentado hasta aquí eran incompletos. No nos habíamos percatado del hecho de que todas las observaciones deben ser realizadas en

un cierto SC y, en lugar de describir su estructura, hacíamos caso omiso de su existencia. Por ejemplo, cuando escribíamos “un cuerpo animado de movimiento uniforme” debíamos realmente haber escrito “un cuerpo animado de movimiento uniforme, respecto a un determinado SC...”. El caso de la cámara giratoria nos enseñó que los resultados de las experiencias mecánicas pueden depender del SC elegido.

Las mismas leyes de la mecánica no pueden ser válidas para dos sistemas de coordenadas que giran uno respecto al otro. Ejemplo: si la superficie del agua de una piscina, que define uno de los SC, es horizontal, la superficie del agua de otra piscina en reposo que constituye el segundo SC tomará la forma curva característica de un líquido, que se hace girar alrededor de un eje.

Al formular las leyes principales de la mecánica omitimos un punto importante. No especificamos para qué SC eran válidas. Por esta razón toda la mecánica clásica está en el aire, pues no sabemos a qué andamiaje se refiere. Dejemos, sin embargo, esta dificultad por el momento. Haremos la suposición, algo incorrecta, de que las leyes de la mecánica valen en todo SC rígidamente unido a la Tierra. Esto lo hacemos con el objeto de fijar un SC, eliminando así la ambigüedad a que nos referíamos. Aun cuando nuestra afirmación de que la Tierra es un sistema de referencia apropiado no es del todo exacta, la aceptaremos por el momento.

Admitimos, pues, la existencia de un SC para el cual las leyes de la mecánica son válidas. ¿Es éste el único? Imaginemos tener un SC, tal como un tren, un vapor o un aeroplano, moviéndose con relación a la Tierra.

¿Valdrán las leyes de la mecánica para estos nuevos SC? Sabemos positivamente que no son siempre válidas, como, por ejemplo en el caso en que el tren toma una curva, en el que el vapor es sacudido por una tormenta o cuando el aeroplano hace un descenso en tirabuzón. Consideremos un SC que se mueve uniformemente en relación al “buen” SC, es decir, para aquel que son válidas las leyes de la mecánica. Por ejemplo, un tren o un vapor ideal moviéndose con una suavidad deliciosa según una línea recta y con velocidad constante. Sabemos por la experiencia diaria que ambos sistemas son “buenos”, que experiencias físicas realizadas sobre un tren o un vapor con tal movimiento, dan exactamente los mismos resultados que si las realizáramos sobre la Tierra. Pero suceden cosas imprevistas si el tren detiene o acelera repentinamente su marcha o si el mar está agitado. En el tren, las valijas caen de sus estantes; en el vapor, las mesas y las sillas se desplazan de su sitio y

los pasajeros se marean. Desde el punto de vista físico esto significa, sencillamente, que las leyes de la mecánica no pueden ser aplicadas a dichos SC, es decir, que son SC “malos”.

Este resultado puede ser expresado por el llamado principio de relatividad de Galileo, que dice: *si las leyes de la mecánica son válidas en un SC, entonces también se cumplen en cualquier SC que se mueva uniformemente con relación al primero*.

Si tenemos dos SC que se desplazan uno respecto del otro no uniformemente, entonces las leyes de la mecánica no pueden ser válidas para ambos.

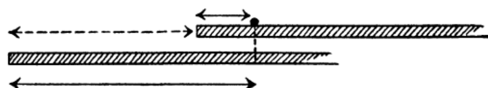
Sistemas de coordenadas “buenos”, esto es, como ya dijimos, para los que se cumplen las leyes de la mecánica, se denominan *sistemas inerciales*. El problema de si existe o no un sistema inercial lo dejamos, por ahora, de lado. Pero si admitimos la existencia de un sistema tal, entonces habrá un número infinito de ellos. En efecto, todo SC que se mueva uniformemente respecto al primero, es también un SC inercial.

Consideremos ahora el caso de dos SC que se mueven uniformemente uno respecto al otro, con velocidad conocida y partiendo de una misma posición determinada. Aquel que prefiera imágenes concretas puede perfectamente pensar en un barco o tren moviéndose en relación con la Tierra. Las leyes de la mecánica deben ser confirmadas experimentalmente con el mismo grado de precisión sobre la Tierra o en el tren o vapor con movimiento uniforme. Las dificultades se presentan cuando el observador de un SC empieza a analizar las observaciones que de un mismo suceso ha hecho otro, situado en el segundo SC. Cada uno de ellos desearía trasladar las observaciones del otro a su propia terminología. Tomemos otra vez un ejemplo sencillo: el mismo movimiento de una partícula es observado desde dos SC, la Tierra y un tren con movimiento uniforme. Ambos sistemas son inerciales. ¿Será suficiente conocer lo observado en un SC para poder deducir lo que se observa en el otro, si están dadas, en cierto instante, las posiciones y las velocidades relativas de los dos SC? Sí. Ahora bien, ya que ambos SC son equivalentes e igualmente adecuados para la descripción de los sucesos naturales, resulta esencial conocer cómo se puede pasar de un SC al otro. Consideremos este problema algo más en abstracto, sin trenes ni vapores. Para simplificarlo investigaremos tan sólo el caso de movimientos rectilíneos. Tengamos, para ello, una barra rígida con una escala métrica y un buen reloj. La barra rígida representa, en el caso del movimiento rectilíneo, un SC de la misma manera que lo era la escala métrica de la torre en la experiencia de Galileo. Resulta siempre más

simple y mejor imaginar un SC como una barra rígida en el caso del movimiento rectilíneo y un andamio o red rígida construida de barras paralelas y perpendiculares en el caso de un movimiento arbitrario en el espacio, dejando de lado paredes, torres, calles, etc.

Supongamos tener dos SC, esto es, dos barras rígidas que representaremos una encima de la otra y que llamaremos, respectivamente, SC "superior" e "inferior". Supongamos que ambos SC se mueven con cierta velocidad, uno respecto al otro, de manera que uno se desliza a lo largo del otro. Resulta cómodo suponer, también, que ambas barras se prolongan indefinidamente en un solo sentido. Es suficiente un reloj para los dos SC; pues el paso del tiempo es el mismo para ambos. Al empezar nuestras observaciones, los extremos iniciales de las barras coinciden. La posición de un punto material está caracterizada en ese momento, evidentemente, por el mismo número en los dos SC; el punto material coincide con la misma lectura de la escala de cualquiera de esas barras, dándonos así un número, y solamente uno, que determina su posición. Si las barras se mueven en las condiciones antes especificadas, los números correspondientes a las posiciones del punto serán diferentes pasado un cierto tiempo. Consideremos un punto material en reposo sobre la barra superior. El número que determina su posición en el SC superior no cambiará con el tiempo; pero el número correspondiente a su posición respecto a la barra inferior, sí cambiará (v. fig. 58). En adelante, para abreviar, usaremos la expresión *coordenada de un punto* para indicar el "número correspondiente a la posición del mismo, respecto a una de las barras".

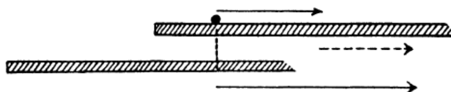
Fig. 58



La figura 58 aclara la siguiente expresión, que si en un principio parece algo oscura es, sin embargo, correcta y expresa algo muy simple: la coordenada de un punto en el SC inferior es igual a su coordenada en el SC superior más la coordenada del origen de este último SC respecto al SC inferior. Lo importante es que se puede calcular siempre la posición de una partícula en un SC, si se conoce su posición en el otro. Para esto se deben conocer en todo momento las posiciones relativas de los dos SC en cuestión. Aun cuando todo esto suena a muy rebuscado, es en realidad muy sencillo y difícilmente merecería una discusión tan detallada, si no fuera porque nos será útil más adelante.

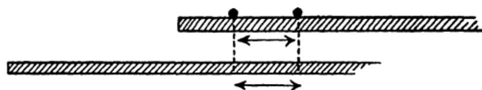
Hagamos notar la diferencia entre la determinación de la posición de un punto y la del instante en que se produce un fenómeno. Cada observador tiene su barra propia que constituye su SC, pero basta sólo un reloj para todos, pues el tiempo es algo "*absoluto*" que pasa igualmente para todos los observadores de cualesquiera SC.

Fig. 59



Tomemos otro ejemplo. Supongamos que un hombre se pasee con la velocidad de 5 km por hora sobre la cubierta de un transatlántico. Esta es su velocidad relativa al barco, o en otras palabras, relativa a un SC atado rígidamente al vapor. Si la velocidad del vapor es de 45 km por hora, relativa a la costa, y si las velocidades del pasajero y del vapor tienen ambas la misma dirección o sentido, entonces la velocidad del primero será de 50 km por hora, respecto a un observador situado en la costa. Podemos formular este hecho de una manera más general y abstracta: la velocidad de un punto material en movimiento relativa al SC inferior es igual a su velocidad respecto al SC superior más o menos la velocidad de este sistema respecto al inferior, según que las velocidades tengan o no igual sentido. (v. fig. 59.) Siempre es posible por lo tanto transformar de un SC a otro las posiciones y las velocidades de un punto, si conocemos las velocidades relativas de dichos sistemas. Las posiciones o coordenadas y las velocidades son ejemplos de magnitudes que al pasar de un SC a otro, cambian según ciertas *leyes de transformación,* que en este caso son muy simples. Existen magnitudes, sin embargo, que se conservan constantes en ambos SC y para las cuales no se requieren leyes de transformación alguna. Tomemos como un ejemplo dos puntos fijos sobre la barra superior y consideremos la distancia entre ellos. Esta distancia es la diferencia de las coordenadas de dichos puntos. Para encontrar las posiciones de dos puntos, relativas a dos SC diferentes, tenemos que usar las leyes de transformación. Pero al calcular la diferencia de las dos posiciones, las contribuciones debidas a los SC distintos se compensan, como resulta evidente de la figura 60.

Fig. 60



La distancia entre dos puntos es por lo tanto invariante, es decir, independiente del SC elegido.

Otro ejemplo de magnitud independiente de la elección del SC lo constituye el cambio de velocidad, concepto familiar en el estudio de la mecánica. Supongamos nuevamente que un punto material que se mueve en línea recta es observado desde dos SC. La variación de su velocidad es igual para ambos sistemas, pues en el cálculo de la diferencia entre las velocidades del móvil antes y después del cambio, no influye la diferencia constante de velocidades de los dos SC. El cambio de velocidad es, pues, también, un invariante; con la condición, desde luego, de que el movimiento relativo de nuestro SC sea uniforme; en caso contrario, es evidente que el cambio de velocidad resultaría distinto para cada uno de los dos SC.

Finalmente, consideremos dos puntos materiales entre los cuales actúan fuerzas que dependen, únicamente, de la distancia que las separa. En el caso de un movimiento rectilíneo, la distancia, y por lo tanto la fuerza, es también invariante. La ley de Newton, que relaciona la fuerza con el cambio de velocidad, será también válida en ambos SC de acuerdo a lo visto en el párrafo anterior. Llegamos así a una conclusión, confirmada por la experiencia diaria, a saber: si las leyes de la mecánica son válidas en un SC, entonces se cumplen en todos los SC en movimiento uniforme respecto al primero. Aun cuando nuestro razonamiento se ha basado sobre simples casos de movimientos rectilíneos, las conclusiones tienen, en realidad, carácter general y pueden ser resumidas como sigue:

1.º No conocemos regla alguna para encontrar un sistema inercial. Dado uno, resulta simple hallar un número infinito de ellos, pues todos los SC en movimiento uniforme, con relación al primero, son sistemas inerciales.
2.° El tiempo correspondiente a un suceso es el mismo en todos los SC, pero las coordenadas y velocidades son diferentes y varían según las leyes de transformación.
3.º Aun cuando las coordenadas y la velocidad cambian de valor al pasar de un SC a otro, la fuerza y la variación de la velocidad, y por lo tanto las leyes de la mecánica, son invariantes con respecto a dichas leyes de transformación.

Las leyes de transformación formuladas para las coordenadas y velocidades serán llamadas leyes de transformación de la mecánica clásica o, más brevemente, la *transformación clásica*.

El principio de relatividad de Galileo, que es válido para los fenómenos mecánicos, afirma, pues, que las mismas leyes de la mecánica son válidas en todos los sistemas inerciales que se mueven los Unos con relación a los otros. Ahora bien, ¿valdrá este principio Para fenómenos no mecánicos, especialmente para aquellos en los cuales el concepto de campo resultó ser tan importante? Todos los Problemas relativos a esta cuestión nos llevan de inmediato al punto inicial de la teoría de la relatividad.

Recordemos que la velocidad de la luz en el vacío o, en otras palabras, en el éter, es de 300.000 km por segundo y que la luz es una onda electromagnética que se propaga a través del éter. El campo electromagnético transporta energía consigo, la que, una vez emitida por la fuente, adquiere una existencia independiente. Por el momento, continuaremos admitiendo que el éter es un medio a través del cual se propagan las ondas electromagnéticas, y, por lo tanto, también las luminosas, aun cuando tengamos plena conciencia de todas las dificultades que entraña la estructuración mecánica del éter.

Imaginémonos estar sentados en una habitación cerrada, aislada de tal manera del mundo exterior que sea imposible la entrada o salida de aire. Si en tal caso pronunciamos una palabra, desde el punto de vista físico, esto significa que hemos creado ondas sonoras que se propagan en todas direcciones, con la velocidad del sonido en el aire. Si en la habitación no hubiera aire u otro medio material nos sería imposible oír la palabra pronunciada. Se ha probado experimentalmente que la velocidad del sonido en el aire es la misma en todas las direcciones si no hay viento y el aire está en reposo en el SC elegido.

Imaginemos ahora que nuestra habitación se mueve uniformemente por el espacio. Un hombre del exterior ve por las paredes, que suponemos transparentes, todo lo que ocurre en el interior de la habitación. De las medidas efectuadas por el observador interior, el observador exterior puede deducir la velocidad del sonido respecto a su SC con relación al cual la habitación está en movimiento.

Nos encontramos de nuevo ante el viejo problema, ya comentado, de determinar la velocidad con respecto a un SC si es conocida en otro SC.

El observador de la habitación sostiene: la velocidad del sonido es, para mí, igual en todas las direcciones.

El observador exterior proclama: la velocidad del sonido, que se propaga en la habitación móvil y que he determinado en mi SC, no es igual en todas

las direcciones. Es mayor que la velocidad normal del sonido en el sentido del movimiento de la habitación y es menor en el sentido opuesto.

Estas conclusiones son consecuencia de la transformación clásica y pueden ser confirmadas por la experiencia. La habitación transporta consigo el medio material, el aire, por el cual se propagan las ondas sonoras y la velocidad del sonido será, por ello, diferente para ambos observadores.

Se pueden sacar algunas conclusiones más de la teoría que considera el sonido como una onda que se propaga a través de un medio material. Una de las maneras, aunque no la más sencilla, de no oír lo que alguien nos dice, sería la de alejarnos con una velocidad mayor que la del sonido, con relación al aire que rodea al que habla, pues las ondas sonoras, en este caso, nunca podrían alcanzar nuestros oídos. Por otra parte, si estuviéramos interesados en captar una palabra importante, dicha con anterioridad y que nunca será repetida, tendríamos que desplazarnos con una velocidad superior a la del sonido para alcanzar la onda correspondiente. No hay nada irracional en ninguno de estos dos ejemplos, excepto de que en ambos casos habría que moverse con una velocidad de unos 350 metros por segundo; podemos muy bien imaginar que el futuro desarrollo técnico hará posible tales velocidades[4]. Una bala de cañón se mueve, en efecto, con una velocidad inicial superior a la del sonido y un hombre, colocado sobre ese proyectil, no oiría nunca el estampido del cañonazo.

Todos estos ejemplos son de un carácter puramente mecánico, pero es posible plantearnos una importante pregunta: ¿podríamos repetir para el caso de una onda luminosa lo que acabamos de decir respecto al sonido? ¿Serán aplicables el principio de relatividad de Galileo y la transformación clásica tanto a los fenómenos mecánicos como a los eléctricos y ópticos? Sería aventurado afirmarlo o negarlo sin antes profundizar su significado.

En el caso de la onda sonora que se propaga en una habitación que se mueve uniformemente con relación al observador exterior, resulta esencial destacar lo siguiente:

1° La cámara móvil arrastra el aire en el que se propaga la onda Sonora.
2° Las velocidades observadas en dos SC que se mueven uniformemente uno respecto a otro están relacionadas por la transformación Clásica.

---

[4] Como efectivamente ha ocurrido: los aviones supersónicos no constituyen actualmente ninguna novedad y las velocidades alcanzadas por los satélites artificiales son mucho mayores.

El problema correspondiente para la luz debe ser formulado de Una manera ligeramente distinta. Los observadores de la habitación ya no están hablando, sino haciendo señales luminosas en todas direcciones. Supongamos además que las fuentes que emiten las ondas luminosas están en reposo permanente en el interior de la cámara. En este caso las ondas luminosas se mueven a través del éter exactamente de la misma manera que las ondas sonoras se propagan en el aire.

¿Es arrastrado el éter, con la habitación, igual que ocurría con el aire? Como no poseemos una imagen mecánica del éter es extremadamente difícil responder a esta pregunta. Si la habitación está cerrada, el aire de su interior se ve forzado a moverse con ella. No tiene sentido, evidentemente, pensar lo mismo para el éter, pues admitimos que toda la materia está sumergida en el mismo y que dicho medio penetra en todas partes. No hay puertas que se cierren para él. En este caso, una habitación en movimiento significa solamente un SC móvil al cual está rígidamente unida la fuente luminosa. No es, sin embargo, imposible imaginar que la habitación que se mueve con su fuente luminosa arrastre al éter consigo, igual que eran transportadas la fuente sonora y el aire por la habitación cerrada. Pero podemos igualmente imaginar lo contrario: que la habitación viaja a través del éter como lo hace un barco por un mar perfectamente tranquilo, sin arrastrar parte alguna del medio por el cual se mueve. En el caso de que la fuente y la habitación arrastren el éter, la analogía con las ondas sonoras sería evidente y se podrían deducir conclusiones similares a las obtenidas en los ejemplos anteriores. En la suposición de que la habitación y la fuente luminosa no arrastren el éter, no existe analogía con las ondas sonoras y las conclusiones a que llegamos para el sonido no valdrán para las ondas luminosas. Estos constituyen los dos casos extremos, pero podríamos imaginar otra posibilidad más complicada, en la cual se considere que el éter sólo es parcialmente arrastrado por la habitación y la fuente luminosa en movimiento. No hay por qué, sin embargo, discutir las suposiciones más complicadas antes de investigar por cuál de los dos casos extremos y más simples se inclina la experiencia.

Empezaremos con la primera de las imágenes y manifestaremos, por lo tanto, que el éter es arrastrado por la habitación en movimiento, a la que está rígidamente unida la fuente luminosa. Si creemos en la validez del sencillo principio de transformación de la velocidad de las ondas sonoras, podremos aplicar nuestras conclusiones anteriores a las ondas luminosas. En efecto, no parece existir motivo aparente alguno para dudar de la ley de transformación

mecánica que establece que las velocidades deben ser sumadas en ciertos casos y restadas en otros. Por el momento admitiremos ambas suposiciones, a saber: la del éter arrastrado por la habitación y su fuente, y la validez de la transformación clásica.

Si encendemos la luz cuya fuente está rígidamente unida a nuestra habitación, entonces la velocidad de la señal luminosa tendrá el valor experimental, bien conocido, de 300.000 km por segundo. En cambio un observador exterior notará el movimiento de la habitación y, por lo tanto, el de la fuente; como el éter es arrastrado, su conclusión será: “la velocidad de la luz en mi SC exterior es diferente en distintas direcciones. Es mayor que la velocidad corriente de la luz en el sentido del movimiento de la habitación y menor en el sentido opuesto”. En conclusión: si el éter es arrastrado con la habitación móvil y si son válidas las leyes de la mecánica, la velocidad de la luz debe depender de la velocidad de la fuente luminosa. La luz que llega a nuestros ojos de una fuente en movimiento tendrá mayor o menor velocidad si aquélla se acerca o aleja de nosotros.

Si nuestra velocidad fuera mayor que la de la luz, podríamos evitar que nos alcanzase; también nos sería posible ver sucesos pasados tratando de alcanzar ondas luminosas emitidas con anterioridad. Las alcanzaríamos en orden inverso al cual fueron emitidas y la sucesión de los acontecimientos sobre la Tierra se nos aparecería como el de una cinta pasada al revés, empezando por el final feliz... Todas estas conclusiones son consecuencia de la suposición de que el SC móvil arrastra el éter consigo y de que son válidas las leyes de la transformación mecánica. Si esto fuera así, la analogía entre la luz y el sonido sería perfecta.

Lamentablemente no hay indicación alguna en favor de estas conclusiones. Por el contrario, son contradichas por todas las observaciones hechas con el propósito de verificarlas. No hay la menor duda sobre la claridad de este veredicto, aun cuando es obtenido Por experiencias más bien indirectas, a causa de las graves dificultades técnicas asociadas a la enorme velocidad de la luz. *La velocidad de la luz es, siempre, la misma en todos los SC, independientemente de si la fuente se mueve, o no, y de cómo se mueve.*

No entraremos en una descripción detallada de todas las investigaciones de las cuales se deduce esta importante conclusión. Nos es, Sin embargo, posible usar algunos argumentos sencillos, que hacen vicha afirmación comprensible, aun cuando no la prueben.

En nuestro sistema planetario, la Tierra y los otros planetas giran alrededor del Sol. No sabemos si existen otros sistemas planetarios similares al

nuestro. Hay sin embargo muchísimos sistemas de estrellas dobles que consisten en dos astros que se mueven alrededor de un mismo punto llamado su centro de gravedad. La observación del movimiento de dichas estrellas revela la validez de la ley de la gravitación de Newton. Supongamos ahora que la velocidad de la luz dependiera de la velocidad del cuerpo que la emite. Entonces el mensaje, o sea el rayo luminoso procedente de la estrella, viajaría más o menos rápidamente según fuera la velocidad de la estrella en el momento de la emisión. En este caso todo el movimiento del sistema se complicaría y sería imposible confirmar, en el caso de estrellas dobles distantes, la validez de la misma ley de gravitación que rige en nuestro sistema planetario.

Consideremos otro ejemplo de una experiencia basada en una idea muy sencilla, Imaginemos una rueda girando muy rápidamente. De acuerdo con nuestra suposición el éter es arrastrado por el movimiento de la rueda y participa de él. Una onda luminosa que pasara cerca de la rueda tomaría una velocidad distinta según que la rueda estuviera en reposo o en movimiento. En otras palabras, la velocidad de la luz en el éter en reposo debería ser distinta de la correspondiente a un éter animado de un rápido movimiento giratorio por efecto de la rueda, de la misma manera que varía la velocidad del sonido entre los días calmosos y los ventosos. ¡Nunca se ha observado tal diferencia! Cualquiera que sea el ángulo desde el cual enfoquemos el asunto, o el experimento crucial que ideemos, el veredicto es siempre contrario a la suposición de que el éter es arrastrado por el movimiento. Luego, los resultados de nuestras consideraciones basadas en argumentos más detallados y técnicos son:

La velocidad de la luz no depende del movimiento de la fuente emisora.
No se debe suponer que los cuerpos en movimiento arrastran al éter consigo.

Nos vemos obligados entonces a abandonar la analogía e ondas luminosas y sonoras, y volver a la segunda suposición: que la materia se mueve a través del éter, no participando éste en el movimiento. Esto significa suponer la existencia de un mar de éter con todos los SC en reposo en él o moviéndose con relación al mismo. Dejemos por ahora la cuestión de si la experiencia demuestra o desecha esta teoría. Convendrá primero familiarizarse con el significado de esta nueva suposición y con las conclusiones que de ella se derivan.

Según la misma, se puede imaginar un SC en reposo respecto al mar de éter. En la mecánica ninguno de los SC en movimiento uniforme puede ser

distinguido de los demás. Todos estos SC eran igualmente “buenos” o “malos”. Si tenemos dos SC en movimiento uniforme el uno respecto al otro, carece de sentido en mecánica preguntarse cuál de ellos está en movimiento y cuál está en reposo. Sólo se pueden observar movimientos uniformes relativos. No podemos hablar de movimiento uniforme absoluto, a causa del principio de relatividad de Galileo. ¿Qué se quiere significar con la expresión de que existe movimiento absoluto y no únicamente movimiento relativo? Simplemente, que existe un SC en el cual algunas de las leyes de la naturaleza son distintas a las de todos los demás SC. También quiere decir que todo observador puede decidir si su SC está en reposo o en movimiento, al comparar las leyes válidas para él con aquellas que rigen en el único sistema que tiene el privilegio absoluto de hacer de SC patrón. Estamos, pues, aquí, frente a un estado de cosas diferente al de la mecánica clásica, donde, como consecuencia del principio de inercia de Galileo, el movimiento uniforme absoluto no tiene sentido.

¿Qué conclusiones pueden deducirse en el dominio de los fenómenos del campo, si se admite la posibilidad de un movimiento a través del éter? Esto significaría la existencia de un SC distinto de todos los demás y en reposo respecto al mar de éter. Es claro que algunas leyes de la naturaleza deben ser diferentes en este SC; de lo contrario, la expresión anterior “movimiento a través del éter” no tendría sentido Si el principio de relatividad de Galileo es válido, entonces no se puede hablar de movimiento a través del éter. Resulta imposible como se ve, reconciliar estas dos ideas. Si en cambio existe un SC especial, fijo en el éter, tiene un significado bien definido hablar de “movimiento absoluto” o “reposo absoluto”.

En realidad, no tenemos mucho que elegir. Hemos tratado de salvar el principio de relatividad de Galileo, suponiendo que los sistemas físicos en movimiento arrastran el éter consigo; pero esto nos condujo a una contradicción con la experiencia. La única solución es abandonar ese principio y probar la hipótesis de que todos los cuerpos se desplazan a través de un mar de éter en reposo.

Aceptado esto, nuestro primer paso es poner a prueba por la experiencia ciertas conclusiones que contradigan el principio de relatividad de Galileo, pero que favorezcan el punto de vista del movimiento a través del éter. Tales experiencias son bastante fáciles de imaginar pero muy difíciles de llevar a la práctica. Como aquí nos interesan especialmente las ideas, dejaremos de lado dichas dificultades técnicas. Volvamos, pues, a nuestra habitación móvil y a

dos observadores, uno interior y otro exterior a la misma. El observador exterior representa el SC fijo en el éter, constituyendo por lo tanto el SC especial, respecto al cual la velocidad de la luz tiene siempre el mismo valor. Y todas las fuentes luminosas, en movimiento o en reposo, en el mar de éter, emiten luz que se propaga con la misma velocidad. Ya hemos dicho que la cámara y su observador se mueven respecto al éter. Imaginemos que en el centro de aquélla se encienda y apague una fuente luminosa y que además sus paredes sean transparentes de manera que ambos observadores, interior y exterior, puedan medir la velocidad de la luz. Preguntemos ahora a cada uno de los observadores los resultados que esperan obtener de sus medidas y sus respuestas serán, más o menos, las siguientes: El observador exterior: Mi SC está determinado por el mar de éter. En este SC el valor de la velocidad de la luz será siempre el mismo. No tengo necesidad de preocuparme si la fuente está en reposo o en movimiento, pues no arrastra el éter consigo. Mi SC es distinto de todos los demás y la velocidad de la luz debe tener su valor normal en este SC, con independencia de la dirección del haz luminoso y del movimiento de la fuente. El observador interior: Mi habitación se mueve a través del éter. Una de sus paredes se aleja de la onda luminosa y la otra se le aproxima. Si mi habitación viajara con la velocidad de la luz con relación al éter, la onda luminosa emitida desde su centro jamás alcanzaría la pared que se aleja. La pared que se mueve hacia la onda luminosa sería alcanzada por ésta antes que la pared opuesta. Por lo tanto, a pesar de que la fuente luminosa esté rígidamente unida a mi SC, la velocidad de la luz no será la misma en todas direcciones. Será menor en el sentido del movimiento de la cámara” mayor en el sentido opuesto.

La velocidad de la luz será, pues, igual en todas las direcciones únicamente respecto al SC que representa el éter fijo. Para todo los otros SC, es decir, en movimiento respecto al éter, la velocidad de la luz dependerá de la dirección en la que la midamos.

Lo que acabamos de exponer constituye la base de un experimento crucial de la teoría del éter fijo. La naturaleza pone a nuestra disposición, en efecto, un sistema que se mueve con una velocidad relativamente grande: la Tierra en su movimiento de traslación alrededor del Sol. Si nuestra hipótesis del éter fijo es correcta, entonces la velocidad de la luz en el sentido del movimiento de la Tierra diferirá de su velocidad en el sentido opuesto. Se puede calcular la diferencia entre ambas velocidades e idear un dispositivo experimental capaz de ponerla de manifiesto. Tratándose, de acuerdo con la teoría, de diferencias muy pequeñas, hubo que construir dispositivos experimentales muy

ingeniosos. Esto lo realizaron Michelson y Morley en sus famosas experiencias. El resultado fue un veredicto de "muerte" para la hipótesis del éter en reposo a través del cual se moverían todos los cuerpos. No pudo observarse ninguna dependencia entre la velocidad de la luz y la dirección de su propagación.

No sólo la velocidad de la luz sino también otros fenómenos del campo debieran mostrar una dependencia de la dirección en el SC móvil si admitimos la hipótesis del éter en reposo. Todas las experiencias han dado el mismo resultado negativo que las de Michelson-Morley, no revelando dependencia alguna, con respecto a la dirección del movimiento de la Tierra.

La situación se pone cada vez más grave. Hemos ensayado dos suposiciones. La primera, que los cuerpos en movimiento arrastran el éter consigo. El hecho de que la velocidad de la luz no dependa del movimiento de la fuente contradice esta hipótesis. La segunda, que existe un SC distinto a todos los demás y que los cuerpos en movimiento no arrastran el éter consigo, sino que viajan a través del mar de éter en reposo. Si esto fuera así, ya hemos visto que el principio de relatividad de Galileo no sería válido, y la velocidad de la luz no podría ser la misma en todos los SC. Nuevamente estamos en contradicción con la experiencia.

Han sido propuestas otras teorías más complicadas, basadas sobre la idea de un arrastre parcial del éter por los cuerpos en movimiento. ¡Pero todas han fallado! Todos los intentos de explicar los fenómenos electromagnéticos en SC móviles, suponiendo el éter en movimiento el éter en reposo o el éter arrastrado parcialmente, resultaron infructuosos.

Esto originó una de las situaciones más dramáticas en la historia de la ciencia Todas las hipótesis referentes al éter conducían a contradicciones con la experiencia. Mirando hacia el pasado de la Física, vemos que el éter apenas nacido se transformó en el "*enfant terrible*" de la familia de las sustancias físicas. Primero tuvo que ser descartada por imposible, la concepción de una imagen mecánica sencilla del éter. Esto causó, en gran parte, la bancarrota del punto de vista mecanicista. Hubo que abandonar la esperanza de descubrir un SC distinto a los demás, fijo en el mar de éter y con ello la posibilidad de existencia del movimiento absoluto. Sólo esta posibilidad, agregada a la de ser el transmisor de las ondas electromagnéticas, justificaría y señalaría la existencia del éter. Han fallado todos los intentos de convertir el éter en una realidad; no se llegó a descubrir ningún indicio sobre su constitución mecánica ni se demostró jamás el movimiento absoluto. Es decir, nada quedó de todas las propiedades del éter, excepto aquella para la cual fue inventado: la

de transmitir las ondas electromagnéticas, y, es más, las tentativas de descubrir las propiedades del éter condujeron a dificultades y contradicciones insalvables. Ante una experiencia tan amarga, parece preferible ignorar completamente el éter y tratar de no mencionar más su nombre. Con el objeto de omitir la palabra que hemos decidido evitar, diremos: nuestro espacio tiene la propiedad física de transmitir las ondas electromagnéticas.

La supresión de una palabra de nuestro vocabulario no constituye, naturalmente, una solución. ¡Las dificultades son demasiado graves para ser solucionadas de esta manera! Enumeramos a continuación los hechos que han sido confirmados por la experiencia sin preocuparnos del problema del "éter".

1.º La velocidad de la luz en el vacío tiene siempre el mismo valor, con independencia del movimiento de la fuente o del observador.
2.° En dos SC en movimiento uniforme relativo, todas las leyes de la naturaleza son idénticas, no habiendo manera alguna de descubrir un movimiento uniforme y absoluto. Muchos experimentos confirman estos dos principios y ninguno los contradice. El primero expresa la constancia de la velocidad de la luz y el segundo generaliza a todos los sucesos de la naturaleza el principio de relatividad de Galileo, formulado inicialmente para los fenómenos mecánicos.

En la mecánica hemos visto que si la velocidad de un punto material tiene un cierto valor respecto a un SC, tendrá un valor distinto en otro SC que se mueve con movimiento uniforme en relación con el primero. Esto es una consecuencia, como ya vimos, de las transformaciones de la mecánica clásica, que son reveladas directamente por la intuición, y, aparentemente, nada erróneo hay en ellas. Debemos agregar, pues, el siguiente principio:

3.° Las posiciones y las velocidades se transforman de un sistema inercial a otro, según la transformación clásica.

Pero esta transformación está en flagrante contradicción con la constancia de la velocidad de la luz. ¡Resulta imposible combinar los enunciados 1.º, 2.° y 3.°!

La transformación clásica parece demasiado evidente y sencilla para intentar modificarla. Ya hemos tratado de cambiar el 1.º o el 2.° y en ambos casos llegamos a un desacuerdo con la experiencia. Todas las teorías referentes al movimiento del "eter" requirieron una alteración del 1.° y del 2.°. Esto

no dio un resultado satisfactorio. Una vez más nos damos cuenta de la seriedad de nuestras dificultades. Ante ellas, se impone una nueva orientación. Esta se consigue *aceptando las suposiciones fundamentales* 1.ª *y* 2.ª y, aun cuando parezca rarísimo, *rechazando la* 3.ª La nueva orientación se origina en un análisis de los conceptos más primitivos y fundamentales; a continuación mostraremos cómo este análisis nos obliga a cambiar los antiguos puntos de vista, y elimina todas nuestras dificultades.

TIEMPO, DISTANCIA, RELATIVIDAD

Las nuevas premisas que adoptamos son:

1.° *La velocidad de la luz en el vacío es la misma en todos los SC en movimiento uniforme relativo.*
2.° *Las leyes de la naturaleza son las mismas en todos los SC en movimiento uniforme relativo.*

La teoría de la relatividad empieza con estas dos suposiciones. De aquí en adelante ya no usaremos más la transformación clásica Porque está en contradicción con estas premisas.

Resulta esencial, aquí como siempre en la ciencia, librarnos de Prejuicios arraigados y a menudo repetidos sin una crítica previa. Corno hemos visto que los cambios en 1.º y 2.° conducen a contradicciones con la experiencia, hemos de tener la valentía de enunciar u validez con toda claridad y atacar el único punto débil, que es la ley de transformación de las posiciones y velocidades de un SC a otro. Nos proponemos deducir conclusiones de 1.º y 2.° y ver dónde Y Como estas suposiciones contradicen la transformación clásica, Para encontrar el significado físico de los resultados así obtenidos.

Usaremos una vez más el ejemplo de la habitación en movimiento con los observadores interior y exterior. Supongamos que, como antes, una señal luminosa es emitida en el centro de la habitación y preguntemos nuevamente a los dos hombres: ¿qué esperan observar, admitiendo nuestros dos principios y olvidando lo dicho previamente respecto al medio a través del cual se propaga la luz? Citamos sus respuestas:

El observador interior: La señal luminosa que parte del centro de la habitación alcanzará simultáneamente las paredes de la misma, ya que dichas paredes están a igual distancia de la fuente luminosa y la velocidad de la luz es igual en todas direcciones.

El observador exterior: En mi sistema la velocidad de la luz es exactamente la misma que en el sistema del observador que se mueve con la habitación. No importa que la fuente luminosa se mueva o no respecto a mi SC, ya que su movimiento no influye en la velocidad de la luz. Lo que veo es una señal luminosa desplazándose con la misma velocidad en todas las direcciones. Una de las paredes trata de escaparse y la opuesta de acercarse a la señal luminosa. Por lo tanto, la señal luminosa alcanzará a la pared que se aleja algo más tarde que a aquella que se acerca. Aun cuando la diferencia será muy pequeña si la velocidad de la habitación es pequeña comparada con la de la luz, la señal luminosa no llegará simultáneamente a las paredes que son perpendiculares a la dirección del movimiento.

Comparando las predicciones de los dos observadores nos encontramos con un resultado muy sorprendente que contradice de plano los aparentemente bien fundados conceptos de la física clásica. Dos sucesos, esto es, los dos rayos luminosos que llegan a las paredes opuestas son simultáneos para el observador interior pera no para el observador exterior. En la física clásica teníamos un único reloj, un solo flujo de tiempo para todos los observadores en todos los SC. El tiempo y, por tanto, conceptos tales como “simultaneidad”, “antes”, “después”, tenían un significado absoluto, independiente del SC. Dos sucesos que ocurrían al mismo tiempo en un SC serán necesariamente simultáneos en todos los demás SC.

Las suposiciones 1.ª y 2.ª, esto es, la teoría de la relatividad, obligan a abandonar ese punto de vista. Hemos descrito dos sucesos que acaecen al mismo tiempo en un SC pero en tiempos diferentes en otro SC. Nuestra labor, ahora, es tratar de entender el significado de la expresión siguiente: “dos sucesos simultáneos en un SC pueden no serlo en otro”.

¿Qué queremos decir por “dos sucesos simultáneos en un SC”? Intuitivamente, todo el mundo cree conocer el significado de esta frase. Pero pongámonos en guardia y tratemos de dar definiciones rigurosas, sabiendo lo peligroso que es sobreestimar la intuición. Contestemos primero a una pregunta sencilla.

¿Qué es un reloj?

La sensación subjetiva primaria del fluir del tiempo nos permite ordenar nuestras impresiones y afirmar que tal suceso tiene lugar antes y aquel otro después. Pero para demostrar que el intervalo de tiempo entre dos sucesos es 10 segundos, necesitamos un reloj. Mediante el uso del reloj, el concepto de tiempo se hace objetivo. Cualquier fenómeno físico puede ser usado como un reloj, con tal de que pueda ser repetido exactamente tantas veces como se desee. Tomando el intervalo entre el principio y el fin de tal suceso como una unidad de tiempo, se pueden medir intervalos de tiempo arbitrarios mediante la repetición de dicho fenómeno. Todos los relojes, desde el simple reloj de arena a los instrumentos más perfeccionados, están basados en esta idea. En el reloj de arena la unidad de tiempo es el intervalo que la arena emplea en pasar de uno a otro recipiente. El mismo proceso físico se puede repetir invirtiendo la posición de los recipientes.

Supongamos que en dos puntos distantes tenemos dos relojes perfectos que indican exactamente la misma hora. Esto debería ser verdad independientemente del método empleado para verificarlo. ¿Pero qué significa esto realmente? ¿Cómo es posible cerciorarse de que relojes distantes entre sí marcan siempre y exactamente la misma hora? El uso de la televisión podría ser un método satisfactorio. Entiéndase que utilizamos la televisión sólo a título de ejemplo y no como algo esencial para nuestro objetivo. Podríamos estar en la proximidad de uno de los relojes y observar por televisión la imagen del otro, comprobando si marcan o no el mismo tiempo simultáneamente. Pero esto no constituiría una prueba exacta. La imagen que obtenemos por televisión es transmitida por ondas electromagnéticas que se propagan con la velocidad de la luz. Con la televisión se ve Una imagen de algo que se produjo un momento antes, mientras que lo que vemos en el reloj real es lo que tiene lugar en el momento presente Esta dificultad puede ser fácilmente evitada, observando, por tele visión, imágenes de los dos relojes en un punto equidistante de ambos Entonces si las señales son emitidas simultáneamente llegarán a dicho punto en el mismo instante. Si dos relojes buenos, observados desde un punto equidistante, indican siempre la misma hora, podrán ser usados para indicar la hora de dos sucesos que tienen lugar en dos puntos distantes.

En la mecánica clásica usábamos un reloj solamente. Pero este proceder no resultaba conveniente porque en tal caso teníamos que realizar todas nuestras medidas en la vecindad del único reloj. Observando el reloj desde cierta distancia no debemos olvidar que lo visto en un determinado instante, realmente sucedió algo antes; así, al contemplar una puesta de sol presenciamos

un hecho sucedido 8 minutos antes. Por esta razón tendríamos que corregir todas las determinaciones del tiempo, según fuera nuestra distancia al reloj.

Como conocemos un método que nos permite determinar si dos o más relojes marcan el mismo tiempo simultáneamente, nos es posible evitar el inconveniente del uso de un solo reloj, imaginando cuantos relojes deseemos en un SC dado. Cada uno de éstos nos servirá para determinar el tiempo de los sucesos que se producen en su vecindad. Todos los relojes están en reposo en relación al SC en cuestión. Son relojes "buenos" y están *sincronizados*, es decir, indican la misma hora simultáneamente.

No hay nada extraño o sorprendente en la disposición de dichos relojes. Usamos muchos relojes sincronizados en lugar de uno, para poder así determinar fácilmente cuándo dos sucesos distantes son simultáneos en un cierto SC; lo que se comprobará, si los relojes sincronizados indican la misma hora en el instante en que se producen los sucesos. Decir que uno de los sucesos distantes se produjo antes que otro tiene ahora un significado definido. Todo esto puede ser juzgado con la ayuda de los relojes sincronizados, en reposo, en nuestro SC.

Esto está de acuerdo con la física clásica, no habiendo aparecido hasta ahora ninguna contradicción con la transformación clásica.

Para la definición de sucesos simultáneos, los relojes son sincronizados por intermedio de señales luminosas o electromagnéticas en general, que viajan con la velocidad de la luz, velocidad que juega un papel tan fundamental en la teoría de la relatividad.

Si nos proponemos tratar el importante problema de dos SC en movimiento uniforme uno respecto al otro, tenemos que considerar dos barras provistas, cada una, de sus relojes. El observador de cada uno de los SC en movimiento relativo tiene su barra y su conjunto de relojes rígidamente unidos a ella.

Al discutir las medidas en la mecánica clásica, usábamos un solo reloj para todos los SC. Aquí tenemos muchos relojes en cada SC. Esta diferencia no tiene importancia. Un reloj era suficiente, pero nadie objetaría el uso de muchos mientras todos se comportaran como deben hacerlo los buenos relojes sincronizados.

Nos estamos aproximando al punto esencial que muestra dónde la transformación clásica se contradice con la teoría de la relatividad. ¿Qué sucede cuando dos grupos de relojes se mueven uniformemente, uno en relación al otro? El físico clásico contestaría: nada; siguen con el mismo ritmo y da lo mismo usar los relojes en movimiento o en reposo para indicar el tiempo.

Según la física clásica dos sucesos simultáneos en un SC serán, también, simultáneos respecto a cualquier otro SC.

Pero ésta no es la única contestación posible. Podemos también imaginar que un reloj en movimiento tenga una marcha distinta a la de otro en reposo. Discutamos ahora esta posibilidad sin decidir por el momento si los relojes realmente cambian su marcha cuando están en movimiento. ¿Qué significa la expresión: un reloj en movimiento modifica su marcha? Supongamos, para simplificar, que en el SC superior hay un reloj y muchos en el SC inferior. Todos los relojes tienen el mismo mecanismo, estando los inferiores sincronizados, esto es, marcan la misma hora simultáneamente.

En la figura 61 hemos representado tres posiciones consecutivas de los dos SC en movimiento relativo. En (a) las posiciones de las agujas de todos los relojes, superior e inferiores, son las mismas: por convención las disponemos así. Todos los relojes indican, pues, la misma hora. En (b) observamos las posiciones relativas de los dos SC algo más tarde. Todos los relojes en el SC inferior marcan el mismo tiempo, pero el reloj superior tiene su marcha alterada. La marcha ha cambiado y señala una hora distinta porque está en movimiento respecto al SC inferior En (c), habiendo pasado más tiempo, la diferencia en la Posición de las agujas es mayor que en (b).

Según esto, un observador en reposo en el SC inferior encontrarla que un reloj en movimiento cambia su marcha. Al mismo resultado llegaría un observador en reposo en el SC superior, al mirar un reloj que se moviera respecto a su sistema; en este caso harían alta muchos relojes en el superior y uno solo en el inferior. Las leyes de la naturaleza deben ser las mismas en ambos SC en movimiento relativo.

En la mecánica clásica se suponía tácitamente que un reloj en movimiento no cambia su marcha. Esto parecía tan evidente que no valía la pena comentarlo. Pero nada debiera ser considerado demasiado evidente; si queremos ser realmente cuidadosos debemos analizar todos los conceptos presupuestos hasta ahora en la física.

Una suposición no debe ser considerada como carente de sentido por el mero hecho de estar en desacuerdo con la física clásica. Es perfectamente posible imaginar que un reloj en movimiento modifique su marcha, mientras la ley de tal cambio sea la misma para todos los SC inerciales.

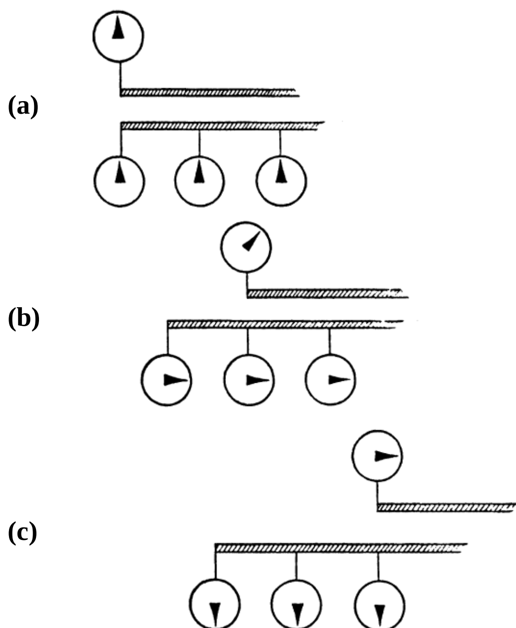


Fig. 44

Otro ejemplo. Tomemos una barra de un metro; esto es, una barra cuya longitud es un metro, en un SG en el cual está en reposo. Supongamos que esta barra adquiera un movimiento uniforme, deslizándose a lo largo de la barra que representa nuestro SG. ¿Seguirá siendo su longitud un metro? Para responder a esta pregunta es necesario saber de antemano cómo determinarla. Mientras dicha barra esté en reposo, sus extremos coincidirán con puntos del SC separados por la distancia de un metro. De aquí concluimos: la longitud de la barra en reposo es de un metro. ¿Pero cómo mediremos su longitud estando en movimiento? Podría hacerse, por ejemplo, como sigue. En un momento dado dos observadores toman simultáneamente fotografías instantáneas, una del origen y otra del extremo de la barra. Como las fotografías fueron tomadas simultáneamente podemos comparar las marcas del SG con las que coinciden con los dos extremos de la barra en movimiento. La distancia entre estas dos marcas nos dará su longitud. Luego se necesitan dos observadores que tomen nota de sucesos simultáneos en diferentes lugares del SG dado. No hay por qué creer que tal medida nos dé el mismo valor que el ob-

tenido cuando la barra está en reposo. Como las fotografías deben ser tomadas simultáneamente, que es, como sabemos, un concepto que depende del SG, es muy posible que el resultado de esta medida sea diferente en diferentes SG en mutuo movimiento relativo.

No sólo nos es posible imaginar que un reloj en movimiento modifique su marcha sino que una barra en movimiento cambie su longitud, siempre que las leyes que rijan dichas variaciones sean las mismas para todos los SG inerciales.

Acabamos de exponer ciertas posibilidades nuevas, sin haber dado justificación alguna para admitirlas.

Recordemos: la velocidad de la luz es la misma en todos los SC inerciales. Es imposible reconciliar este hecho con la transformación clásica El círculo debe romperse en alguna parte. ¿No podría ser precisamente aquí? ¿No podremos suponer cambios tales en la marcha de un reloj en movimiento y en la longitud de una barra móvil, que resulte, como consecuencia directa, la constancia de la velocidad de la luz? Ciertamente que sí. Estamos frente al primer ejemplo en que la teoría de la relatividad y la mecánica clásica difieren radicalmente Nuestra argumentación puede ser invertida: si la velocidad de la luz es la misma en todos los SG, entonces las barras en movimiento deben cambiar su longitud y los relojes modificar su marcha, y las leyes que rigen estos cambios están rigurosamente determinadas.

No hay nada misterioso ni irracional en todo esto. En la física clásica se había supuesto siempre que los relojes tienen la misma marcha en movimiento que en reposo y que las barras poseen la misma longitud en reposo que en movimiento. Pero si la velocidad de la luz es la misma en todos los SC, si la teoría de la relatividad es válida, debemos sacrificar estas suposiciones de la física clásica. Es difícil librarse de prejuicios profundamente arraigados, pero no tenemos otra salida. Desde el punto de vista de la teoría de la relatividad, los viejos conceptos parecen arbitrarios.

¿Por qué creer, como hemos expuesto unas páginas antes, en un fluir absoluto del tiempo, idéntico para los observadores de todos los SC? ¿Por qué creer en distancias inalterables? El tiempo se determina con relojes; las coordenadas espaciales con varas de medir, y el resultado de su determinación puede depender del comportamiento de dichos relojes y varas cuando están en movimiento. Nada nos autoriza a creer que han de comportarse como a nosotros nos gustaría. La observación indica indirectamente, por los fenómenos del campo electromagnético, que al estar en movimiento, se modifica efectivamente la marcha de un reloj y la longitud de una barra, cosa que no

podíamos prever basándonos en los fenómenos mecánicos. Tenemos que aceptar el concepto de un tiempo relativo a cada SC, porque es la mejor manera de resolver nuestras dificultades. El progreso científico posterior basado en la teoría de la relatividad indica que este nuevo aspecto no debe ser considerado como un *malum necessarium*, pues los méritos de la teoría son demasiado notorios.

Hasta aquí hemos tratado de mostrar qué hechos condujeron a las hipótesis fundamentales de la teoría de la relatividad y cómo esta teoría nos forzó a revisar y reemplazar la transformación clásica, al considerar el tiempo y el espacio bajo una nueva luz. Nuestro objeto es indicar las ideas que forman la base de un nuevo punto de vista físico y filosófico. Son ideas simples, pero la manera como hemos formulado es insuficiente para poder llegar a conclusiones cuantitativas. Nos conformamos, como antes, con explicar solamente las ideas principales, exponiendo algunas otras sin probarlas.

Para aclarar la diferencia entre el punto de vista de un físico clásico (a quien llamaremos C) que cree en la transformación clásica, y un físico moderno (a quien llamaremos M) que conoce la teoría de la relatividad, imaginaremos un diálogo entre ambos.

C. — Yo creo en el principio de la relatividad de la mecánica de Galileo porque sé que las leyes de la mecánica son las mismas E dos SC en movimiento uniforme relativo; en otras palabras, que las leyes son invariantes con respecto a la transformación clásica.

M. — Pero el principio de relatividad debe aplicarse a todos los sucesos del mundo exterior; no sólo a las leyes de la mecánica, sino que todas las leyes de la naturaleza deben ser las mismas en los distintos SC en movimiento uniforme y relativo entre sí.

C. — Pero, ¿cómo es posible que todas las leyes de la naturaleza sean las mismas en SC en movimiento uniforme relativo entre sí? Las ecuaciones del campo, esto es, las ecuaciones de Maxwell, no son invariantes respecto a la transformación clásica. Esto resulta claro considerando el ejemplo de la velocidad de la luz; pues según la transformación clásica, esta velocidad no debe ser la misma en dos SC en movimiento relativo entre ellos.

M. — Esto indica sencillamente que la transformación clásica no vale; que la relación entre dos SC debe ser diferente; es decir, que no podemos relacionar las coordenadas y las velocidades según dichas leyes de transformación. Nos vemos obligados, en consecuencia, a sustituirlas por nuevas

transformaciones que se deducen de las hipótesis fundamentales de la teoría de la relatividad. Pero no nos preocupemos de la forma matemática de las nuevas leyes de transformación y contentémonos con saber que son diferentes de las clásicas. Las llamaremos, brevemente, la transformación de Lorentz. Se puede demostrar que las ecuaciones de Maxwell, es decir, las leyes del campo electromagnético, son invariantes con respecto a la transformación de Lorentz, como las leyes de la mecánica lo son respecto a la transformación clásica. Recordemos cuál era la situación en la física relativista. Teníamos unas leyes de transformación para las coordenadas, otras para las velocidades, pero las leyes de la mecánica eran las mismas en dos SC en movimiento uniforme y relativo entre sí. Teníamos leyes de transformación para el espacio pero no para el tiempo, porque éste era el mismo en todos los SC. En la teoría de la relatividad el panorama es distinto. Tenemos leyes de transformación para el espacio, el tiempo y la velocidad, distintas de las leyes clásicas; pero las leyes de la naturaleza, también aquí, deben ser las mismas en todos los SC con movimiento uniforme relativo. Dicho de otra manera, estas leyes deben ser Invariantes, no respecto a la transformación clásica, sino respecto a un nuevo tipo de transformación, la llamada transformación de Lorentz. O sea, en todos los SC inerciales valen las mismas leyes y la transición de un SC a otro está determinada por la transforma- clon de Lorentz.

C. — Creo en su palabra pero me interesaría saber la diferencia entre las dos transformaciones.

M. — Contestaré de la siguiente manera a su pregunta: Cite algunas de las cualidades características de la transformación clásica y yo trataré de explicar si se conservan en la transformación de Lorentz y, en caso negativo, cómo cambian.

C. — Si se produce un fenómeno en cierto punto y en determinado instante en mi SC, un observador de otro SC en movimiento uniforme, con relación en la cual el fenómeno ocurre, pero le asigna, naturalmente, el mismo tiempo. Nosotros usamos el mismo reloj para todos los SC y no tiene ninguna relevancia que se mueva o no; ¿es esto cierto para usted también?

M. — No, no lo es. Cada SC tiene que ser equipado con sus propios relojes en reposo, pues el movimiento modifica su marcha. Los observadores en dos SC distintos asignarán no sólo números diferentes a la posición, sino distintos valores al instante en el cual se produce el fenómeno en cuestión.

C. — Esto quiere decir que el tiempo no es ya un invariante. En la transformación clásica, el tiempo es idéntico en todos los SC. En cambio en la

transformación de Lorentz varía y se comporta de una, manera análoga al de una coordenada en la transformación clásica. Y me pregunto, ¿qué sucede con la distancia? Según la mecánica clásica la longitud de una barra rígida es la misma, esté en movimiento o en reposo. ¿Vale esto también en la teoría de la relatividad?





Fig. 62

M. — No. En efecto, de la transformación de Lorentz se deduce que una barra móvil se contrae en la dirección de su movimiento y esta contracción aumenta con la velocidad. Cuanto más rápidamente se mueve una barra, tanto más corta aparece. Pero esto sucede sólo en la dirección del movimiento. En la figura 62 se ve cómo una barra reduce su longitud a la mitad, al moverse con una velocidad aproximadamente igual al 90% de la velocidad de la luz. En la figura 63, está ilustrado el hecho de que no hay contracción en la dirección perpendicular al movimiento.





Fig. 63

C. — Bien. Esto quiere decir que la marcha de un reloj y la longitud de una barra en movimiento dependen de su velocidad. ¿Pero cómo?

M. — Estos cambios se hacen más notables al aumentar la velocidad. De la transformación de Lorentz se deduce que la longitud modo análogo, la marcha de un "buen" reloj en movimiento se haría más lenta en comparación con la de los relojes que fuera con velocidad de la luz.

C. — Esto parece contradecir toda nuestra experiencia. Sabemos, en efecto, que un vehículo en movimiento no reduce su longitud y encuentra en el camino habiendo entre ellos un acuerdo perfecto, que el conductor puede

comparar su “buen” reloj con los que contrariamente a lo que usted afirma.

M. — Eso es verdaderamente cierto. Pero estas velocidades mecánicas son todas muy pequeñas en comparación con la de la luz y por ello es ridículo aplicar la relatividad a dichos fenómenos. Todo viajero puede aplicar, con seguridad, la física clásica, aun si pudiera aumentar su velocidad en 100.000 veces su valor. Hay que esperar discrepancias entre la experiencia y la transformación clásica solamente para velocidades próximas a la de la luz. Es decir, que la transformación de Lorentz puede ser puesta a prueba, únicamente para velocidades muy grandes.

C. — Aún encuentro otra dificultad. Según la mecánica puede imaginar cuerpos animados de velocidades superiores a las de la luz. Un cuerpo que se mueve con la velocidad de la luz respecto un barco en movimiento, tiene una velocidad mayor que la de la luz respecto a la costa. ¿Qué le ocurrirá a una barra cuya longitud reduce a cero cuando va a la velocidad de la luz? Parece imposible imaginar una longitud negativa si la velocidad es mayor que la luz.

M. — No hay en realidad razón para tal sarcasmo. Desde el punto de vista de la teoría de la relatividad un cuerpo material no de tener una velocidad superior a la de la luz. Esta velocidad constituye un límite insuperable. Si la velocidad de un cuerpo respecto barco es igual a la de la luz, tendrá el mismo valor respecto a la constante. La sencilla ley mecánica de adición y sustracción de velocidad ya no es válida o, dicho de otra manera, es solamente aplicable caso de velocidades pequeñas. El número que expresa la velocidad de la luz aparece explícitamente en la transformación de Lorentz representa el límite, análogo al de la velocidad infinita en la mecánica clásica. La relatividad no contradice ni la transformación ni mecánica clásicas. Al contrario, se recuperan los conceptos clásicos como un caso límite al considerar velocidades pequeñas. Desde punto de vista de la nueva teoría está claro en qué casos es aplicable la física clásica y en cuáles no. Sería tan ridículo aplicar la teoría de la relatividad al movimiento de autos, barcos o trenes como u una máquina de calcular donde fuera suficiente una tabla de multiplicar.

RELATIVIDAD Y MECÁNICA

La teoría de la relatividad surgió por necesidad, debido a profundas y serias contradicciones de la teoría clásica que aparecí como irresolubles. La fuerza de la nueva teoría reside en la competencia y simplicidad con que se resuelven aquellas dificultades permitiendo, solamente, unas pocas y muy convincentes hipótesis.

Aun cuando esta teoría surgió del problema del campo, abarcar todas las leyes físicas. Aquí parece que hay una dificulta En efecto, las leyes del campo electromagnético son de naturaleza completamente diferente a las leyes de la mecánica. Las ecuaciones del campo electromagnético son invariantes con respecto a la transformación de Lorentz, mientras que las ecuaciones de la mecánica son invariantes respecto a la transformación clásica. Pero la teoría de la relatividad pretende que todas las leyes de la naturaleza sean invariantes respecto a la transformación de Lorentz y no con respecto a la clásica. Esta última transformación es sólo un caso límite especial de la transformación de Lorentz cuando la velocidad relativa de los dos SC en consideración es muy pequeña. Si esto es así, la mecánica clásica debe cambiar para poder satisfacer la condición de invariancia respecto a la transformación de Lorentz. O, en otras palabras, la mecánica clásica no puede ser válida cuando las velocidades se aproximan a la de la luz. Sólo puede existir una transformación de un SC a otro, a saber, la transformación de Lorentz.

Fue tarea simple modificar la mecánica clásica para ponerla de acuerdo con la teoría de la relatividad sin contradecir por ello el caudal de datos experimentales explicados por aquélla. La mecánica antigua es válida para velocidades pequeñas y constituye un caso límite de la nueva mecánica. Es interesante considerar un ejemplo en que la teoría de la relatividad introduce una modificación en la mecánica clásica. Esto puede, tal vez, conducirnos a ciertas conclusiones que permitan ser puestas a prueba por la experiencia. Supongamos que sobre un cuerpo de masa determinada y en movimiento rectilíneo actúe una fuerza exterior en la dirección del movimiento. Como sabemos, la fuerza es proporcional a la variación de la velocidad. O, para ser más explícitos, resulta indiferente que un cuerpo dado aumente su velocidad en un segundo de 100 a 101 metros por segundo, o de 100 kilómetros a 100 kilómetros y un metro por segundo, o de 300.000 kilómetros a 300.000 kilómetros y un metro por segundo. La fuerza que actúa sobre un cuerpo es siempre la misma para un cambio de velocidad dado, en igual tiempo.

¿Vale esta ley también para la teoría de la relatividad? ¡De ninguna manera! Esta ley vale únicamente para pequeñas velocidades.

Pero según la teoría de la relatividad, ¿qué ley se cumple para velocidades próximas a las de la luz? La respuesta es: si la velocidad es grande, se requieren fuerzas extremadamente grandes para aumentarla. No es lo mismo, en modo alguno, aumentar en un metro por segundo una velocidad de 100 metros por segundo, que hacerlo a una velocidad próxima a la de la luz, Cuanto más se acerque la velocidad de un cuerpo a la velocidad de la luz, tanto más difícil será aumentarla. Cuando una velocidad es igual a la de la luz todo aumento ulterior resulta imposible. Esta modificación producida por la teoría de la relatividad no nos ha de sorprender, ya la velocidad de la luz es un límite insuperable para todas las velocidades. Ninguna fuerza finita, por grande que sea, puede provoca un aumento de velocidad más allá de dicho límite. En lugar de la ley de la mecánica clásica que relaciona la fuerza con el cambio de velocidad, aparece en la relatividad una ley más complicada. Desde el nuevo punto de vista, la mecánica clásica resulta simple, porque en casi todas nuestras observaciones nos encontramos con velocidades mucho menores que la de la luz.

Un cuerpo en reposo tiene una masa perfectamente definida llamada masa en reposo. La mecánica nos ha enseñado que todo cuerpo se resiste a cambiar su movimiento; cuanto mayor es masa tanto más grande es esta resistencia; a menor masa menor resistencia. Pero en la teoría de la relatividad hay que considerar, además, que esa resistencia aumenta con la velocidad. Cuerpos con velocidades próximas a la de la luz ofrecerían una resistencia más grande a la acción de fuerzas exteriores. En la mecánica clásica la resistencia de un cuerpo dado es una constante caracterizada por su masa solamente. En la teoría de la relatividad depende de la masa en reposo y de la velocidad. La resistencia se hace infinitamente grande al alcanzar la velocidad de la luz.

Los resultados que acabamos de citar nos permiten somete esta teoría a la prueba de la experiencia. ¿Resistirán los proyectiles con velocidades próximas a la de la luz la acción de fuerzas externas, en la medida prevista por la teoría de la relatividad? Como conclusiones de esta teoría en este aspecto son de carácter cuantitativo, podríamos confirmarla o refutarla si nos fuera posible lanza cuerpos con semejantes velocidades.

La naturaleza, por suerte, nos ofrece proyectiles con tales velocidades. Los átomos de los cuerpos radiactivos, como los del radar por ejemplo, actúan como baterías que disparan proyectiles con velocidades enormes. Sin entrar en detalles citemos uno de los conceptos fundamentales de la física y de la

química modernas. Todas las sustancias del Universo están formadas por una pequeña variedad de *partículas elementales*. Esta idea de la constitución de la materia recuerda la construcción de los edificios de una ciudad, de distinto tamaño y arquitectura; pero tanto la casucha como el rascacielos, todos ellos, han sido edificados con una escasa variedad de ladrillos. Así, todos los elementos conocidos de nuestro mundo material desde el hidrógeno que es el más liviano al uranio que es el más pesado[5], están constituidos por los mismos ladrillos, esto es, por la misma clase de partículas elementales. Los elementos más pesados, las construcciones más complicadas, son inestables y se desintegran: decimos que son radiactivos. Algunos ladrillos, es decir, las partículas elementales que forman los átomos radiactivos, son a veces expulsados del interior del átomo con velocidades próximas a la de la luz. Un átomo de un elemento como el radio, según los conocimientos actuales, confirmados por numerosas experiencias, es una estructura complicada y la desintegración radiactiva es uno de los fenómenos que ponen de manifiesto que los átomos están formados de un cierto número de partículas elementales.

Por experiencias ingeniosas e intrincadas se pudo estudiar la forma como las partículas emitidas por los átomos radiactivos resisten a la acción de fuerzas exteriores. Estas experiencias confirman las predicciones de la teoría de la relatividad. También en otros casos donde la influencia de la velocidad sobre la resistencia al cambio de movimiento ha podido ser estudiada, se encontró un completo acuerdo entre la teoría y la experiencia. Aquí vemos, una vez más, las características esenciales del trabajo científico creativo: la predicción de ciertos hechos por la teoría y su confirmación por la experiencia.

La consecuencia anterior sugiere una generalización importante. Un cuerpo en reposo tiene masa pero no energía cinética, es decir, energía de movimiento. Un cuerpo en movimiento tiene masa y energía cinética, y se resiste al cambio de movimiento más fuertemente que el cuerpo en reposo. Todo sucede, pues, como si la energía cinética de un cuerpo aumentara su resistencia. De dos cuerpos con la misma masa en reposo, el de mayor energía cinética se resiste más intensamente a la acción de fuerzas exteriores.

Imaginemos una caja en reposo que contiene un cierto número de pequeñas esferas en su interior, también en reposo en nuestro SC. Para ponerla en movimiento y para aumentar su velocidad se requiera la acción de una fuerza. ¿Pero la misma fuerza aumentará su velocidad en la misma medida durante

---

[5] En la actualidad y por métodos artificiales, se han podido producir elementos más pesados. La inestabilidad de sus núcleos es la causa de que no se puedan encontrar en la naturaleza.

un tiempo igual, si las esferitas de su interior se hallan en rápido movimiento en todas las direcciones, como las moléculas de un gas, con velocidades que se aproximan a la de la luz? No. En este caso se requerirá la acción de una fuerza mayor para producir el mismo efecto, debido a la mayor energía cinética de las esferitas que hace aumentar la resistencia de la caja al cambio de movimiento. Como se ve, la energía cinética resiste al cambio de movimiento igual que la materia ponderable. ¿Vale esto también para todas las formas de la energía?

La teoría de la relatividad deduce de sus suposiciones fundamentales una respuesta clara y convincente a esta pregunta, una respuesta, nuevamente, de carácter cuantitativo: toda forma de energía se resiste al cambio de movimiento; es decir, la energía se comporta como la materia. Un pedazo de hierro calentado al rojo pesa más que el mismo cuando está frío. La radiación, emitida por el Sol y que se propaga por el espacio, contiene energía y por lo tanto tiene masa; el Sol y todas las estrellas radiantes pierden masa al emitir su radiación. Esta conclusión, de carácter completamente general, constituye una importante consecución de la teoría de la relatividad y responde a todas las experiencias en que ha sido puesta a prueba.

La física clásica introduce dos tipos de sustancias: materia y energía; ponderable la primera e imponderable la segunda. En la física clásica hay dos principios de conservación: uno para la materia y otro para la energía. Ya nos hemos preguntado si este punto de vista sigue siendo válido en la física moderna. La respuesta es negativa. En efecto, para la teoría de la relatividad no existe una diferencia esencial entre masa y energía. La energía tiene masa y la masa representa energía. En lugar de dos principios de conservación tenemos uno solo, el de la conservación de la masa-energía. Esta nueva concepción resultó muy útil y de gran importancia para el desarrollo ulterior de la física.

¿Cómo es posible que esta equivalencia entre energía y masa haya permanecido tanto tiempo ignorada? ¿Un trozo de hierro caliente pesa realmente más que cuando está frío? La respuesta es ahora “sí”, pero en la página 37 fue “no”. Las páginas que median entre estas dos respuestas no ignoran esta contradicción.

La dificultad presente es del mismo tipo que otras encontradas anteriormente. La variación de la masa, predicha por la teoría de la relatividad, es inmensamente pequeña y no puede ser revelada por pesadas directas ni aun con las balanzas más precisas y sensibles. La comprobación de que la energía

es ponderable ha podido ser realizada de maneras muy concluyentes, pero indirectas.

La razón que hace imposible una comprobación directa de dicha equivalencia reside en la excesiva pequeñez del coeficiente de intercambio entre materia y energía. En comparación con la masa, la energía es como una moneda depreciada respecto a otra de gran valor. Aclaremos esto con un ejemplo. ¡La cantidad de calor necesaria para convertir 30.000 toneladas de agua en vapor, pesaría aproximadamente un gramo! La energía ha sido considerada durante tanto tiempo como imponderable porque la masa que representa es muy pequeña. El antiguo concepto de energía como sustancia imponderable es la segunda víctima de la teoría de la relatividad. La primera fue el medio por el cual se suponía que se propagaban las ondas luminosas.

¡La influencia de la teoría de la relatividad va mucho más lejos del problema que la originó! Soluciona las diversas dificultades y contradicciones de la teoría del campo; formula unas leyes de la mecánica más generales; reemplaza dos principios de conservación por uno solo y modifica nuestro concepto clásico del tiempo absoluto. Su validez no se limita a un dominio de la física sino que constituye un marco general que abarca todos los fenómenos de la naturaleza.

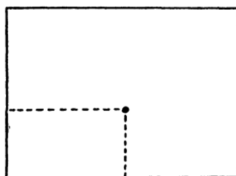
EL CONTINUO ESPACIO-TIEMPO

“La Revolución Francesa empezó en París, el 14 de julio de 1789.” En esta frase se registra el lugar y el tiempo en que se produjo un suceso. Para una persona que no sabe lo que significa “Paris”, la oración podría aclararse enseñándole que París es una ciudad de nuestra Tierra situada a 2° de longitud Este del meridiano de Greenwich y a 49° de latitud Norte. Estos dos números caracterizan el lugar, y la frase “14 de julio de 1789” determina el tiempo en el cual tuvo lugar dicho acontecimiento. En la física, mucho más que en la historia, la determinación exacta del lugar y el tiempo en que se produjo un suceso es de la mayor importancia, pues estos datos forman la base para una descripción cuantitativa.

Para simplificar, consideremos primeramente sólo movimientos rectilíneos Nuestro SC es, nuevamente, una barra rígida que se prolonga indefinidamente en uno de los sentidos. Tomemos diferentes puntos de la barra; sus posiciones quedan perfectamente caracterizadas con sólo dar un número, la coordenada de cada uno. Decir que la coordenada de un punto es 7.586 metros

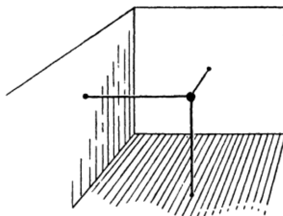
significa que su distancia al extremo, origen de la barra, es de 7.586 metros. Inversamente, dado un número cualquiera y una unidad, se puede siempre encontrar un punto de la barra que corresponda a ese número. Podemos, en consecuencia, afirmar que: a todo número corresponde un punto determinado de la barra y a todo punto de la misma corresponde un número. Este hecho lo expresan los matemáticos con el siguiente enunciado: la totalidad de los puntos de una barra constituyen un *continuo unidimensional*. Esto quiere decir que al lado de cualquier punto de la barra existen otros tan cercanos a él como se quiera. De otra manera, es posible unir dos puntos distantes de la barra por pasos arbitrariamente pequeños. Así pues, la pequeñez arbitraria de los pasos que unen puntos distantes es una característica esencial del continuo.

Fig. 64



Consideremos ahora un plano, o si se prefiere algo más concreto, la superficie rectangular de una mesa (fig. 64). La posición de punto de la misma puede ser determinada por dos números y no como antes, por uno solo. Estos dos números miden las distancias del punto a dos bordes perpendiculares de la mesa. Es decir, a cada punto del plano le corresponde no uno sino un par de números; y, recíprocamente, a todo par de números le corresponde un determinado punto del plano. En otras palabras: el plano es un *continuo bidimensional*. Existen puntos arbitrariamente cercanos a todo punto del plano. Dos puntos distantes pueden ser unidos por una curva dividida en segmentos tan pequeños como se quiera. Luego la pequeñez arbitraria de los pasos que unen dos puntos distantes, cada uno de los cuales puede ser representado por dos números, es lo que caracteriza fundamentalmente a un continuo bidimensional.

Fig. 65



Imaginemos que pretendemos considerar nuestra habitación como nuestro SC. Esto significa que deseamos describir todas posibles posiciones de un punto como el de la figura 65, respecto a las paredes rígidas de la habitación. Por ejemplo, la posición de la base de la lámpara, supuesta en reposo, puede ser fijada por tres números: dos de ellos determinan las distancias a dos paredes perpendiculares y el tercero la distancia al techo o al suelo. Es decir, a cada punto del espacio le corresponden tres números definidos; y, recíprocamente, cada tres números determinan un punto del espacio. Esto se expresa diciendo: nuestro espacio es un *continuo tridimensional*. Existen puntos muy próximos a todo punto del espacio. Luego lo que caracteriza un continuo tridimensional es la pequeñez arbitraria de los pasos con los cuales se puede cubrir la distancia entre dos puntos cualesquiera del mismo, cada uno de los cuales está representado por tres números.

Pero todo esto es más geometría que física. Para volver a ésta tenemos que considerar el movimiento de las partículas materiales. En la observación y predicción de los fenómenos naturales debemos tener en cuenta, además del lugar, el tiempo en que suceden. Tomemos nuevamente un ejemplo muy sencillo.

Dejemos caer desde una torre una piedra pequeña que puede ser considerada como una partícula material. Imaginemos que la torre tenga la altura de 78,4 metros. Desde Galileo nos es posible predecir la coordenada de la piedra en cualquier instante de su caída. En la tabla siguiente mostramos las posiciones de la piedra a los 0, 1, 2, 3 y 4 segundos de su recorrido.

Tiempo de caída en segundos	Altura desde el suelo, en metros
0	78,4
1	73,5
2	58,8
3	34,3
4	0

En la tabla están registrados cinco sucesos, estando representado cada uno por dos números, el tiempo y la coordenada espacial correspondientes. El primero es la iniciación de la caída de la piedra desde una altura de 78,4 metros, en el instante 0 del tiempo. El segundo suceso es la coincidencia de la piedra con nuestra barra rígida (la torre) a 73,5 metros de altura. Esto ocurre al final del primer segundo. El último acontecimiento registrado en la tabla

lo constituye la coincidencia (altura 0) de la piedra con la tierra, al cuarto segundo de caída.

Se pueden representar los datos de esta tabla de una manera diferente, haciendo corresponder a cada par de números un punto de una superficie. Para ello debemos establecer primero una escala (fig. 66): un segmento corresponderá a 30,50 metros y otro, a un segundo de tiempo.

Fig. 66



A continuación trazamos dos líneas perpendiculares entre sí, llamando eje de tiempo a la horizontal y eje de espacio a la vertical.

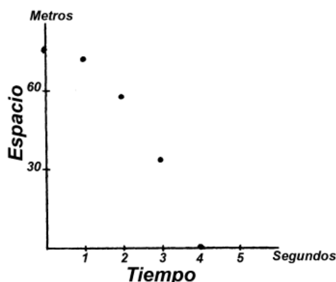


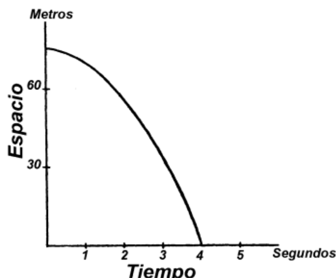
Fig. 67

Inmediatamente se ve que nuestra tabla puede ser representada por cinco puntos del plano espacio-tiempo (fig. 67).

Las distancias de los puntos al eje de espacio dan las coordenadas temporales según la primera columna de la tabla y las distancias al eje de tiempo, las coordenadas espaciales.

La misma cosa ha sido expresada de dos maneras diferentes: por una tabla y por puntos de un plano; cada una puede ser deducida de la otra. La elección entre estos dos tipos de representaciones es, simplemente, una cuestión de preferencia, ya que, de hecho, son equivalentes.

Demos otro paso. Imaginemos una tabla más completa que nos dé las posiciones no cada segundo, sino cada centésima o cada milésima de segundo. Tendremos entonces, una gran cantidad de puntos en nuestro gráfico espacio-tiempo. Finalmente, si la posición de la partícula está dada para cada instante o, como dicen los matemáticos, si la coordenada espacial está dada como una función del tiempo, entonces nuestro conjunto de puntos se transforma en una línea continua. La figura 68 representa, por lo tanto, el conocimiento completo del movimiento de la partícula y no, como antes, de una pequeña fracción del mismo.

Fig. 68 

El movimiento a lo largo de la barra rígida (la torre), es decir, en un espacio unidimensional, está representado en la citada figura 68 por una curva, en el continuo bidimensional espacio-tiempo. A cada Punto de nuestro continuo espacio-tiempo le corresponde un par de números, uno de los cuales da el tiempo y el otro la coordenada del espacio Recíprocamente: a cada par de números que caracterizan cierto suceso, le corresponde un punto determinado del plano espacio-tiempo. Dos puntos adyacentes representan dos sucesos, dos acontecimientos, ocurridos a corta distancia y separados por un intervalo pequeño de tiempo.

Se podría argüir contra nuestra representación de la siguiente manera: no tiene sentido representar la unidad de tiempo por un segmento, combinándolo mecánicamente con el espacio para formar el continuo bidimensional a partir de los dos continuos unidimensionales. Pero en tal caso habría que protestar con igual energía contra los gráficos que representan, por ejemplo, la temperatura de la ciudad de Barcelona durante el último verano; así como contra aquellos que representan las variaciones del coste de la vida durante un cierto número de años, pues en ellos usamos, exactamente, el mismo método. En los gráficos de temperatura se combinan el continuo unidimensional de la temperatura con el continuo unidimensional del tiempo, en un continuo bidimensional temperatura-tiempo.

Volvamos ahora al caso del cuerpo o partícula arrojado desde lo alto de la torre de 78,4 metros. Nuestra representación gráfica del movimiento es un convenio útil, pues caracteriza la posición de la partícula en un instante arbitrario del tiempo.

Esta representación gráfica se puede interpretar de dos maneras distintas. Una de ellas es imaginar el movimiento como una serie de sucesos en el continuo unidimensional del espacio, sin mezclarlo con el tiempo, usando una imagen dinámica, según la cual las posiciones del cuerpo cambian con el

tiempo. La otra consiste en formarnos una imagen estática del movimiento, considerando la curva en el continuo bidimensional espacio-tiempo. Según esta manera de interpretarlo el movimiento está representado como algo que es, que existe, en el continuo bidimensional espacio-tiempo y no como algo que cambia en el continuo unidimensional del espacio.

Ambas imágenes son exactamente equivalentes y preferir una de ellas es cuestión de convención o de gusto.

Nada de lo que acabamos de exponer respecto de las dos imágenes del movimiento tiene relación alguna con la teoría de la relatividad. Se pueden usar ambas representaciones con igual derecho, aun cuando la física clásica se inclinó más bien por la imagen dinámica que describe al movimiento como una serie de sucesos en el espacio, y no como algo ya existente en el espacio-tiempo. Pero la teoría de la relatividad modifica este punto de vista. Se ha declarado abiertamente en favor de la imagen estática, encontrando en esta representación del movimiento una imagen más objetiva y conveniente de la realidad. Pero, ¿por qué estas dos imágenes son equivalentes desde el punto de vista de la física clásica y no desde el punto de vista de la teoría de la relatividad?

Para contestar esta pregunta consideremos nuevamente dos SC en movimiento uniforme el uno con respecto al otro.

De acuerdo con la física clásica, los observadores de cada uno de dichos SC asignarán a cierto suceso distintas coordenadas espaciales, pero la misma coordenada del tiempo. En nuestro ejemplo, la coincidencia de la partícula con la tierra está caracterizada, en el SC que hemos elegido, por la coordenada "4" del tiempo y por la coordenada "O" del espacio. Según la mecánica clásica, el cuerpo que cae alcanzará la superficie de la tierra al 4.° segundo, también para un observador que se mueva uniformemente respecto al SC anterior. Pero este observador referirá la distancia a su SC y atribuirá, en general, diferentes coordenadas de espacio al fenómeno de la colisión, aun cuando la coordenada tiempo será la misma para él, y para todos los observadores que se muevan uniformemente los unos respecto a los otros. La física clásica admite sólo un fluir "absoluto" del tiempo. Para cada SC, el continuo bidimensional se puede descomponer en dos continuos unidimensionales: tiempo y espacio. Debido al carácter "absoluto" del tiempo, la transición de la imagen "estática" del movimiento a la "dinámica" tiene un significado objetivo en la física clásica.

Hemos visto ya que la transformación clásica no debe ser usada Siempre en la física. Desde un punto de vista práctico, esta transformación sirve para

cuando se trata de pequeñas velocidades; pero no cuando se trata de resolver cuestiones fundamentales de la física.

Según la teoría de la relatividad, el instante en que se produce la colisión entre el cuerpo y la tierra, no será el mismo para todos los observadores. Tanto las coordenadas de tiempo como las de espacio serán diferentes en los dos SC y la variación de la primera será tanto más notable cuanto más próxima a la velocidad de la luz sea la velocidad relativa. Por ello el continuo bidimensional no puede ser partido en dos continuos unidimensionales como en la física clásica. No se puede considerar separadamente el tiempo y el espacio, al determinar las coordenadas espacio-tiempo, al pasar de un SC a otro. La división del continuo bidimensional en dos unidimensionales es, desde el punto de vista de la teoría de la relatividad, u procedimiento arbitrario carente de significado objetivo.

Resulta fácil generalizar lo expuesto hasta ahora para el caso de un movimiento que no está limitado a una línea recta. Para describir los sucesos de la naturaleza debemos usar, en realidad, cuatro y no dos números. Nuestro espacio físico, concebido a partir de los objetos y sus movimientos, tiene tres dimensiones, y las posiciones quedan determinadas por tres números. El instante en que se produce el suceso es el cuarto número. Todo suceso queda caracterizado por cuatro números; y a cada cuatro números corresponde, red recíprocamente, un suceso. Por eso, el mundo de los sucesos es un continuo de cuatro dimensiones. No hay nada misterioso en esto y la última afirmación es tan cierta para la física clásica como para la teoría de la relatividad. La diferencia aparece cuando se consideran dos SC en movimiento relativo. Consideremos una habitación en movimiento y dos observadores, uno interior y otro exterior, determinando las coordenadas del tiempo y del espacio, para los mismos sucesos. La física clásica descompone también, aquí, el continuo tetradimensional en el espacio tridimensional y el continuo unidimensional del tiempo. El físico clásico se preocupa sólo de la transformación espacial ya que el tiempo lo considera absoluto, encontrado, en consecuencia, natural y conveniente la subdivisión del continuo tetradimensional de su mundo, en espacio y tiempo. Pero desde el punto de vista de la teoría de la relatividad, tanto el tiempo como el espacio varían al pasar de un SC a otro mediante la transformación de Lorentz.

El Universo de los sucesos puede ser descrito dinámicamente por una imagen que cambia con el tiempo, proyectada sobre el fondo constituido por el espacio tridimensional. Pero también puede describir por una imagen estática proyectada en el continuo tetradimensional espacio-tiempo. Para la física

clásica ambas imágenes son equivalentes. En cambio, para la física relativista, resulta más conveniente y más objetiva la imagen estática.

Aun en la relatividad se puede usar la imagen dinámica, si así lo preferimos. Pero debemos recordar que esta división en tiempo y espacio no tiene significado objetivo, pues el tiempo ya no es "absoluto". Teniendo en cuenta sus limitaciones, en las siguientes páginas utilizaremos todavía el lenguaje "dinámico" y no el "estático".

LA RELATIVIDAD GENERAL

Nos queda todavía un punto por aclarar. Una de las cuestiones más fundamentales no ha sido resuelta aún: ¿existe un sistema inercial? Hemos aprendido ciertas leyes de la naturaleza, su invariancia frente a la transformación de Lorentz y su validez para todos los sistemas inerciales en movimiento uniforme relativo. Tenemos las leyes pero no conocemos el marco al cual referirlas.

A fin de destacar esta dificultad hagamos una entrevista a un físico clásico y planteémosle algunas preguntas sencillas:

—¿Qué es un sistema inercial?

—Es un SC en el cual son válidas las leyes de la mecánica. Un cuerpo sobre el cual no actúan fuerzas exteriores se mueve uniformemente en tal SC. Esta propiedad nos permite distinguir un SC inercial de cualquier otro.

—Pero... ¿qué entiende cuando dice que sobre el cuerpo no actúan fuerzas exteriores?

—Significa, simplemente, que el cuerpo se mueve uniformemente en un sistema inercial.

Aquí podríamos preguntar de nuevo: ¿Qué es un sistema inercial? Pero como hay pocas esperanzas de obtener una respuesta distinta a la anterior, tratemos de conseguir alguna información más Concreta cambiando nuestra pregunta:

—¿Es inercial un SC rígidamente unido a la Tierra?

—No, porque las leyes de la mecánica no son rigurosamente válidas en la Tierra debido a su rotación. Un SC rígidamente unido al Sol puede ser consi-

derado en muchos casos como inercial; pero cuando se habla del Sol en rotación se entiende que un SC conectado con él, no puede considerarse estrictamente inercial.

—Entonces, ¿qué es, concretamente, su sistema inercial y de qué manera podemos encontrar Uno?

—Es meramente una ficción útil y no tengo ni idea de cómo llevarla a la práctica. Salvo que pudiera alejarme suficientemente de todo cuerpo material y librarme de todas las influencias exteriores; mi SC sería, entonces, inercial.

—¿Pero qué entiende usted por un SC libre de toda influencia exterior?

—Un SC que es inercial.

¡Hemos vuelto, otra vez, a nuestra pregunta inicial!

Nuestra entrevista pone de manifiesto una gran dificultad de la física clásica. Tenemos leyes pero no conocemos el sistema de referencia en el que son válidas; toda la física parece edificada sobre la arena.

Se puede llegar a la misma dificultad por otro camino. Imaginemos que exista un solo cuerpo en todo el Universo, y que constituya nuestro SC. Este cuerpo empieza a girar. Según la mecánica clásica, las leyes físicas para un cuerpo en rotación son diferentes de las leyes respecto a un cuerpo sin rotación. Si el principio de inercia es válido en un caso, no lo es en el otro. Pero todo esto resulta sospechoso. ¿Tiene acaso sentido hablar del movimiento de un cuerpo que suponemos único en todo el Universo? No; porque se considera que un cuerpo está en movimiento, cuando cambia su posición respecto a otro. Por esto resulta contrario al sentido común hablar del movimiento de un cuerpo aislado. La mecánica clásica y el sentido común se nos presentan, aquí, en violento desacuerdo. El remedio que da Newton para resolver este entredicho es el siguiente: si el principio de inercia es válido, el SC está en reposo o en movimiento uniforme; si este principio no se cumple, el cuerpo está en movimiento no uniforme. Luego, se puede decidir si un cuerpo está en movimiento o en reposo, según que las leyes de la física sean o no aplicables a un SC unido rígidamente al mismo.

Tomemos dos cuerpos, el Sol y la Tierra por ejemplo. El movimiento que observamos es relativo. Se puede describir uniendo el SC a la Tierra o al Sol. Desde este punto de vista, la gran contribución de Copérnico reside en el hecho de haber transferido el SC de la Tierra al Sol. Pero como el movimiento es relativo y se puede hacer uso de cualquier sistema de referencia, parece no existir ninguna razón para preferir uno de los dos SC. La física interviene y modifica el punto de vista del sentido común. El SC unido al Sol se parece

más a un sistema inercial que el SC vinculado a la Tierra. Por eso las leyes físicas deben ser aplicadas al SC de Copérnico y no al de Tolomeo. La grandeza del descubrimiento de Copérnico solamente puede ser apreciada desde el punto de vista físico. Ilustra la gran ventaja que resulta de usar un SC rígidamente unido al Sol en la descripción del movimiento de los planetas.

En la física clásica no existe el movimiento uniforme absoluto. Si dos SC se mueven uniformemente el uno respecto al otro, no tiene sentido decir "este SC está en reposo y el otro en movimiento", Pero si dos SC se mueven no uniformemente uno respecto al otro, hay muy buenas razones para decir: "este cuerpo se mueve y el otro está en reposo" (o se mueve uniformemente). El movimiento absoluto tiene, en este último caso, un significado bien concreto. Hay en este punto, como dijimos arriba, un profundo abismo entre el sentido común y la física clásica. Las dificultades mencionadas referentes a la existencia de un sistema inercial y a la del movimiento absoluto, están sólidamente relacionadas entre sí. El movimiento absoluto se hace posible si admitimos la existencia de un sistema inercial.

Pudiera parecer que no hay solución a estas dificultades, que ninguna teoría física es capaz de eludirlas. Su raíz reside en el hecho de haber postulado que las leyes de la naturaleza sólo tienen validez para un tipo especial de SC, el inercial. La posibilidad de resolver estas dificultades depende de la respuesta a la siguiente pregunta. ¿Podemos formular las leyes físicas de manera que sean válidas para todos los SC, es decir, no solamente para los que se mueven uniformemente, sino también para aquellos que se mueven arbitrariamente unos respecto de los otros? Si esto es posible, habremos resuelto nuestras dificultades. En tal caso seremos capaces de aplicar las leyes de la naturaleza a cualquier SC. Y la lucha tan violenta, en los comienzos de la ciencia, entre las ideas de Tolomeo y las de Copérnico, perderá sentido, pudiendo emplearse, con igual justificación, cualquiera de los dos SC. Las dos afirmaciones "el Sol está en reposo y la Tierra se mueve" o "el Sol se mueve y la Tierra está en reposo" significarían, simplemente, dos convenciones distintas que se referirían a dos SC diferentes.

¿Podríamos realmente construir una física relativista válida en todos los SC; una física en la que no haya lugar para el movimiento absoluto, sino sólo para los movimientos relativos? ¡Esto es efectivamente posible!

Poseemos al menos una indicación, aunque muy débil, que nos ayudará a edificar la nueva física. Una verdadera física relativista debe ser aplicable a todo SC y, por lo tanto, también al caso especial de los SC inerciales. Ya

conocemos las leyes referentes a los SC inerciales. Las nuevas leyes generales que han de cumplirse en todos los SC deben, en el caso particular de los SC inerciales, reducirse a las leyes de la mecánica clásica.

El problema de formular unas leyes físicas válidas para todo SC fue resuelto por la llamada *teoría general de la relatividad*, llamándose *teoría de la relatividad restringida (o especial)* la que se aplica solamente a sistemas inerciales. Las dos no pueden, naturalmente, contradecirse, pues las leyes de la relatividad restringida han de estar contenidas en las de la relatividad general. Pero así como antes las leyes de la física fueron formuladas únicamente para los sistemas inerciales, ahora éstos constituirán un caso límite especial de todos los SC que se mueven arbitrariamente.

Éste es el programa de la teoría general de la relatividad. Pero al esbozar el camino por el cual se realizó debemos ser aún más vagos de lo que fuimos hasta aquí. Las nuevas dificultades que aparecen en el desarrollo de la ciencia hacen que la teoría sea cada vez más abstracta. Aventuras insospechadas nos esperan. Nuestro objeto final es un entendimiento mejor de la realidad. Nuevos eslabones se agregan siempre a la concatenación lógica entre la teoría y la observación. Para limpiar de suposiciones innecesarias y artificiales el camino que conduce de la teoría a la experiencia; para abarcar dominios de la realidad cada vez mayores, hemos de alargar la cadena cada vez más. Cuanto más simples y fundamentales son nuestras hipótesis, tanto más intrincado resulta nuestro instrumento matemático de razonamiento; la ruta que conduce de la teoría a la observación se hace más larga, más sutil y más intrincada. Aun cuan parezca paradójico, podríamos decir: la física moderna es más simple que la física clásica y parece, por lo tanto, más difícil y más complicada. Cuanto más simple es nuestra imagen del mundo exterior y cuanto mayor es el número de hechos que abarca, con tanta mayor fuerza refleja en nuestra conciencia la armonía del Universo.

La nueva idea es sencilla: construir una física válida en cualquier SC. Su realización trae aparejadas complicaciones formales y nos obliga a emplear procedimientos matemáticos hasta ahora no usados en la física. En lo que sigue expondremos tan sólo la conexión entre la realización de dicho programa y dos problemas importantes: la gravitación y la geometría.

FUERA Y DENTRO DEL ASCENSOR

El principio de inercia marca, en realidad, el verdadero comienzo de la física. Fue adquirido, como sabemos, imaginando el experimento ideal de un cuerpo en movimiento perenne, sin rozamiento ni bajo la acción de ninguna otra fuerza exterior. Con este ejemplo y después con otros más, hemos podido aquilatar la importancia de la introducción del experimento ideal. Aquí vamos a discutir, también, experimentos ideales. Aunque éstos puedan parecer demasiado fantásticos, nos ayudarán, sin embargo, a comprender todo lo que se pueda de la teoría de la relatividad, con las limitaciones inherentes a los métodos simples que estamos utilizando.

Ya hemos tratado de experiencias ideales con una habitación en movimiento uniforme. Aquí, para cambiar, tendremos un ascensor que cae.

Imaginemos que un gran ascensor está en lo alto de un rascacielos mucho más alto que cualquier rascacielos real. Supongamos que el cable que lo sostiene se rompe y el ascensor empieza, entonces, a caer libremente. Dentro del mismo hay observadores que realizan diversas experiencias durante la caída Al describirlas no debemos preocuparnos de la resistencia del aire ni del rozamiento, pues despreciamos sus efectos en las condiciones ideales. Uno de los observadores saca un reloj y un pañuelo de su bolsillo y los suelta. ¿Qué les sucede? Para una persona exterior, que ve lo que pasa en el interior del ascensor, por una ventana por ejemplo, el pañuelo y el reloj caen exactamente de la misma manera, con la misma aceleración. Recordemos que la aceleración de la caída es completamente independiente de la masa del cuerpo que cae y que fue este hecho el que reveló la igualdad entre la masa inerte y la gravitatoria (pág. 115). No olvidemos, sin embargo, que según la mecánica clásica esta igualdad es absolutamente accidental y que no tuvo influencia alguna sobre su estructura. Aquí, por el contrario, esa igualdad, reflejada en que la aceleración de la caída de todos los cuerpos es la misma, es esencial constituye la base de nuestra argumentación.

Volvamos al pañuelo y al reloj que están cayendo con la misma aceleración que el ascensor, con sus paredes, techo y suelo. Por esta misma razón la distancia de esos dos objetos al suelo no variará. Para el observador interior permanecen exactamente donde los soltó; además, puede ignorar la existencia del campo gravitatorio ya que su causa está fuera de su SC. El encuentra que sobre los dos cuerpos no actúa fuerza alguna y que están en reposo, exactamente como si estuvieran en un SC inercial. ¡Curioso!, ¿verdad? Si uno de los observadores empuja el reloj o el pañuelo en cualquier dirección, para

arriba o para abajo, por ejemplo, éste adquiere cierta velocidad, que conserva después de cesar la acción de empujar, es decir, que continúa moviéndose rectilíneamente hasta alcanzar el techo o el suelo respectivamente. En resumen, las leyes de la mecánica clásica se cumplen para el observador interior, pues todos los cuerpos se comportan según uno esperaría del principio de inercia. El SC rígidamente unido al ascensor durante su caída libre difiere de un sistema inercia en un solo aspecto. En un SC inercial, un móvil sobre el que actúan fuerzas seguirá moviéndose eternamente con velocidad constante. Un SC inercial de la física clásica no está limitado ni en el tiempo ni en el espacio. El caso del observador dentro del ascensor es, sin embargo, diferente. El carácter inercial de su SC sí está limitado en espacio y tiempo. Tarde o temprano el objeto con movimiento uniforme chocará con la pared del ascensor, destruyéndose, así, este movimiento. Tarde o temprano todo el ascensor chocará con la tierra destruyendo a los observadores mismos y sus instrumentos. Es decir, este SC es solamente una “edición de bolsillo” de un SC inercial verdadero.

El carácter local de este SC es completamente esencial. Si nuestro ascensor imaginario se extendiera del ecuador al polo con el pañuelo suelto sobre el primero y el reloj sobre el último, entonces, para el observador exterior, los dos cuerpos no tendrían la misma aceleración; no estarían en reposo el uno respecto al otro. ¡Y toda nuestra argumentación fallaría! Las dimensiones del ascensor tienen que ser limitadas de tal modo que un observador exterior vea caer con idéntica aceleración a todos los cuerpos de dentro.

Con esta restricción, el SC toma un carácter inercial para un observador situado en su interior. Por fin estamos en condiciones de indicar un SC en el cual todas las leyes de la física son válidas, aun cuando esté limitado en el tiempo y el espacio. Si nos imaginamos otro SC, otro ascensor en movimiento uniforme relativamente al primero, éste constituirá, también, un SC inercial local y todas las leyes serán exactamente iguales en ambos. El paso de uno a otro no está dado por la transformación de Lorentz.

Veamos cómo describen ambos observadores lo que ocurre en el ascensor.

El observador exterior nota el movimiento del ascensor y de todos los cuerpos que están dentro del mismo y comprueba que se mueven según la ley de la gravitación de Newton. Para él, el movimiento no es uniforme, sino acelerado, debido precisamente a la acción de la fuerza de gravedad. Pero una generación de físicos nacidos y criados en el interior del ascensor razonaría de una manera totalmente distinta. Ellos se creerían en posesión de un sistema

inercial y referirían todas las leyes de la naturaleza al ascensor, afirmando, con justificación, que estas leyes toman una forma especialmente simple en su SC. Resultaría natural que supusieran su ascensor en reposo y que su SC es inercial.

Es, en efecto, imposible liquidar las diferencias entre un observador interior y uno exterior. Cada uno de ellos podría proclamar su derecho de referir los sucesos a su SC. Ambas descripciones resultarían igualmente consistentes.

Del análisis que acabamos de hacer se ve que es posible efectuar una descripción consistente de los fenómenos físicos en dos SC diferentes aun cuando no se desplacen con movimiento uniforme el uno respecto al otro. Pero en tal caso hemos de tener en cuenta la gravitación, que constituye, por así decirlo, el "puente" que permite pasar de un SC al otro. El campo gravitatorio existe para el observador exterior, pero no para uno de dentro. El movimiento acelerado y el campo gravitatorio existen para el observador exterior, y hay reposo y ausencia de dicho campo para uno interior al ascensor. Pero el "puente" del campo gravitatorio que hace posible la descripción en ambos SC descansa sobre un pilar muy importante, a saber: la equivalencia entre la masa gravitatoria y la inerte. Sin esta clave, que pasó inadvertida para la mecánica clásica, nuestro presente razonamiento fracasaría por completo.

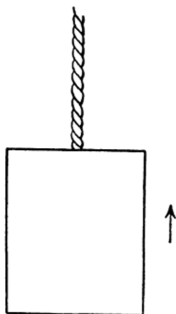


Fig. 69

Consideraremos en seguida una variante de nuestro experimento ideal. Supongamos que tenemos un SC inercial, en el que vale la ley de inercia. Ya hemos descrito lo que sucede en un ascensor en reposo respecto a un SC tal. Pero alguien de afuera ha atado un cable a nuestro ascensor y tira del mismo con una fuerza constante, en el sentido indicado por la flecha de la figura 69. No importa cómo lo haga. Como las leyes de la mecánica son válidas en este

SC, el ascensor se moverá con una aceleración constante hacia arriba. Atendamos, aquí también, a las descripciones de lo que sucede en el interior del ascensor, dadas por un observador interior y otro exterior:

El *observador exterior*: Mi SC es inercial. El ascensor se mueve con una aceleración constante porque una fuerza constante está actuando sobre él. Los viajeros del ascensor están en movimiento absoluto, pues para ellos no son válidas las leyes de la mecánica. En efecto, un observador interior no observa que los cuerpos sobre los que no actúan fuerzas permanezcan en reposo: si se suelta un cuerpo éste choca pronto con el suelo del ascensor ya que éste se mueve hacia arriba. Esto le ocurre tanto a un reloj como a un pañuelo. Me parece rarísimo el hecho de que el observador de adentro pueda separarse del "suelo" del ascensor, porque en cuanto da un salto, el piso lo alcanza en seguida.

El *observador interior*: No veo razón alguna —dice— para creer que mi ascensor esté en movimiento absoluto. Estoy de acuerdo con que un SC rígidamente unido a mi ascensor no es realmente un SC inercial, pero no pienso que ello signifique que esté en movimiento absoluto. Mi reloj, mi pañuelo, como el resto de los cuerpos del ascensor, caen cuando los suelto, porque todo el ascensor está en un campo gravitatorio. Yo constato exactamente la misma clase de movimiento de caída que el que encuentra un habitante de la Tierra, quien lo explica muy simplemente por la acción de un campo de gravitación. Lo mismo vale, evidentemente, en mi caso.

Ambas interpretaciones, la del observador de dentro por una parte y la del de fuera del ascensor por la otra, son igualmente coherentes y no existe, aparentemente, posibilidad alguna de decidir cuál de ellos tiene razón. En resumen, que estamos en nuestro derecho de admitir cualquiera de ellas para explicar el comportamiento de los objetos dentro del ascensor, a saber: movimiento no uniforme y ausencia de un campo gravitatorio según el observador exterior, o reposo y presencia de un campo gravitatorio de acuerdo con el observador interior.

El observador exterior puede suponer que el ascensor está en movimiento "absoluto" no uniforme. Pero un movimiento que puede ser cancelado por la suposición de que actúa un campo gravitatorio no puede tener las pretensiones de "absoluto".

Parece haber, sin embargo, un recurso para salir de la ambigüedad en que nos encontramos. Imaginemos que por una ventana lateral entra en el ascensor un rayo de luz horizontal, alcanzando la pared opuesta al cabo de un tiempo muy corto. Veamos cómo sería predicha por nuestros observadores la trayectoria de la luz.

El *observador exterior*, que cree en el movimiento acelerado del ascensor, argüirá: el haz luminoso penetra por la ventana desplazándose horizontalmente y en línea recta hacia la pared opuesta. Pero el ascensor se mueve hacia arriba, cambiando de posición durante el tiempo que tarda la luz al pasar de una a la otra pared. El rayo no iluminará, por lo tanto, el punto exactamente opuesto al de su entrada, sino un poco más abajo. La diferencia, aunque muy pequeña, es real y en consecuencia resulta que la luz se desplaza respecto al ascensor sobre una línea curva, como la de la figura 70, y no sobre la recta punteada de la misma figura.

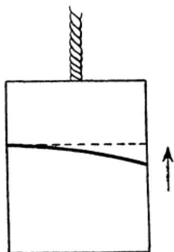


Fig. 70

El *observador interior*, que cree en la presencia de un campo gravitatorio que actúa sobre todos los objetos de su ascensor, diría:

"El ascensor no tiene tal movimiento acelerado; en su interior simplemente actúa un campo gravitatorio. Un haz luminoso que es imponderable no será afectado por la gravedad. Si se propaga en dirección horizontal alcanzará un punto exactamente opuesto al de su entrada."

Parece resultar de esta discusión que existe una posibilidad de decidir entre ambos puntos de vista, ya que el resultado sería distinto según fuera cierta una u otra afirmación. Si no hay nada ilógico en ninguno de los razonamientos que acabamos de exponer, entonces toda nuestra argumentación previa cae por tierra, resultando, pues, imposible describir consistentemente todos los fenómenos en cuestión por dos caminos distintos: con o sin campo gravitatorio.

Pero hay, afortunadamente, un error grave en el razonamiento del observador interior, que salva nuestra conclusión. Este decía:

"Un haz luminoso que es imponderable, no será afectado por la gravedad".

¡Esto no es cierto! Un haz de luz posee energía y la energía tiene masa. Pero toda masa inerte es atraída por un campo gravitatorio ya que la masa inerte y la masa gravitatoria son equivalentes. Un haz luminoso se curvará en un campo gravitatorio exactamente igual que lo haría la trayectoria de un cuerpo lanzado horizontalmente con una velocidad igual a la de la luz. Así vemos que si el observador interior hubiera razonado correctamente, tomando en cuenta la curvatura de un haz luminoso en un campo gravitatorio, habría llegado al mismo resultado que el observador exterior.

El campo gravitatorio terrestre es, naturalmente, demasiado pequeño para que la curvatura que adquieren los rayos luminosos en él pueda ser demostrada directamente por la experiencia. En cambio, las famosas investigaciones realizadas durante los eclipses solares prueban de modo concluyente, aunque indirecto, la influencia de un campo gravitatorio sobre la trayectoria de un rayo de luz.

De los ejemplos expuestos resulta que hay una esperanza bien fundada de formular una física relativista. Pero para ello hay que atacar primero el problema de la gravitación.

Del análisis que hemos hecho de lo que ocurre en el ascensor de nuestro ejemplo, se ve la posibilidad de edificar una física nueva, relativista, eliminando por completo los fantasmas clásicos del movimiento absoluto y de los SC inerciales. Nuestros experimentos idealizados muestran cuán íntimamente relacionados entre sí están la teoría general de la relatividad y el problema de la gravitación universal y por qué la equivalencia entre las masas inerte y gravitatoria juega un papel esencial en esta relación. Es claro que la solución del problema de la gravitación proporcionada por la teoría general de la relatividad ha de ser diferente de la de Newton. Las leyes de la gravitación deben ser formuladas para todos los SC posibles, como todas las leyes naturales, mientras que las leyes de la mecánica clásica de Newton se cumplen únicamente en los SC inerciales.

Nuestro próximo ejemplo será aún más fantástico que el del as- censor que cae. Nos vemos obligados a plantear un problema nuevo: el de la relación entre la teoría general de la relatividad y la geometría. Empecemos con la descripción de un mundo en el que sólo viven entes bidimensionales y no, como el nuestro, que es habitado por seres tridimensionales. El cine nos ha acostumbrado a las criaturas bidimensionales que actúan sobre una pantalla bidimensional. Bueno, permítasenos imaginar ahora que esas sombras e imágenes de la pantalla tengan una existencia verdadera, real; que se trate de seres que piensan y que crean su propia ciencia, y que el telón bidimensional constituya su espacio geométrico. Estas criaturas son incapaces de imaginar, de un modo concreto, un espacio tridimensional, igual que nosotros no podemos imaginar un mundo de cuatro dimensiones. Pueden curvar una línea recta, saben lo que es una circunferencia; pero son incapaces de construir una esfera, porque esto significaría salirse de su pantalla bidimensional. Nosotros estamos en una situación similar. Somos capaces de flexionar y curvar líneas y superficies, pero no tiene sentido para nuestra imaginación la idea de espacios tridimensionales curvos.

Viviendo, pensando y experimentando, nuestros entes-imágenes podrían, con el tiempo, llegar al conocimiento de la geometría bidimensional de Euclides. Podrían probar, por ejemplo, que la suma de los ángulos de un triángulo es 180 grados. Les sería fácil construir círculos concéntricos, unos pequeños y otros muy grandes, y demostrar que la relación entre las circunferencias de dos cualesquiera de ellos es igual a la relación entre sus radios respectivos, lo que constituye un resultado también característico de la geometría euclidiana. Si la pantalla fuera infinitamente grande esas criaturas imágenes descubrirían que caminando en una dirección y sentido determinados, nunca vuelven al lugar de partida.

Imaginemos ahora que alguien exterior a la pantalla. De la “tercera dimensión”, los traslada del telón a una superficie esférica de radio muy grande. Si nuestras criaturas bidimensionales son muy pequeñas en relación a la superficie de la esfera y no poseen los medios necesarios para desplazarse a distancias muy grandes ni tienen medios de comunicación entre puntos demasiado alejados, entonces no se podrán dar cuenta del cambio de la naturaleza de su espacio. La suma de los ángulos de triángulos pequeños será, aún, 180 grados. Dos circunferencias concéntricas, pequeñas, todavía mostrarán que el cociente entre sus longitudes y el cociente de sus radios son iguales.

Un paseo por un camino rectilíneo y siempre en el mismo sentido, nunca los conducirá al punto de partida.

Pero supongamos que esos entes de dos dimensiones desarrollen, con el tiempo, una ciencia y una técnica avanzadas; que encuentren medios de comunicación que les permitan cubrir largas distancias rápidamente. Descubrirán, entonces, que siguiendo siempre “hacia delante”, podrán finalmente volver a su posición de partida. Siempre “hacia delante” y sin desviación significa desplazarse sobre una circunferencia máxima de la esfera. También encontrarán que el cociente entre los radios de dos círculos no es igual al cociente de sus circunferencias si uno de los radios es pequeño y el otro muy grande.

Si dichos seres bidimensionales son conservadores, si han estudiado la geometría euclidiana por generaciones y generaciones cuando no poseían aún los veloces medios modernos de comunicación, es decir, cuando esta geometría estaba de acuerdo con la experiencia, es casi seguro que harán todo esfuerzo posible para sostener la geometría de Euclides a pesar de la evidente contradicción con, sus medidas. Podrían hacer cargar a la física con la culpa de las discrepancias encontradas, buscando ciertas razones como, por ejemplo, diferencias de temperatura que deformen las líneas y hagan que aparentemente no valga la geometría euclidiana. Pero, tarde o temprano, se convencerán de que hay un modo más lógico y conveniente de describir esos hechos. Y comprenderán al fin que mundo es finito obedeciendo a principios geométricos distintos de los que conocían. Entenderán que a pesar de su incapacidad para imaginarlo, su mundo es la superficie bidimensional de una esfera. Pronto encontrarán nuevos fundamentos para la geometría de espacio que, aun siendo distinta de la de Euclides, puede ser, sin embargo, formulada con igual lógica y coherencia. Para las generaciones posteriores, educadas en la nueva geometría de la esfera, la geometría de Euclides parecerá más complicada y artificial, pues no se ajusta a los hechos observados.

Volvamos ahora a criaturas tridimensionales.

¿Qué implica la afirmación de que nuestro espacio de tres dimensiones es de naturaleza euclidiana? Quiere decir que todas las consecuencias lógicas, deducidas de la geometría de Euclides, son confirmadas por la experiencia. Se puede construir, con cuerpos rígidos o con rayos luminosos, objetos cuyas formas correspondan a las de los objetos ideales de la geometría. La arista de una regla o un rayo luminoso corresponden a una línea recta; la suma de los ángulos de un triángulo, construido con barras rígidas y finas, es igual a 180 grados; la relación entre los radios de dos circunferencias con centro común,

hechas de alambre delgado y rígido, es igual a la de dichas circunferencias. Interpretada de esta manera, la geometría euclidiana se transforma en un sencillo capítulo de la física.

Pero se puede imaginar que se hubieran descubierto discrepancias; verbigracia, que la suma de los ángulos de un triángulo muy grande, construido con barras que por muchas razones hubiera que considerar rígidas, no fuera de 180 grados. Como estamos acostumbrados a la idea de una representación concreta de las figuras en la geometría euclidiana por cuerpos rígidos, buscaríamos seguramente alguna causa física que afectara nuestras barras de tal manera que se pudiera dar una explicación de su comportamiento anormal. Para salvar a la geometría euclidiana, acusaríamos a nuestros objetos de no ser verdaderamente rígidos, de no corresponder exactamente a los de dicha geometría. Trataríamos, también, de descubrir la naturaleza de las fuerzas a las que atribuimos las deformaciones y sus influencias sobre otros fenómenos, y buscaríamos una representación más perfecta de las figuras de nuestra geometría. Si no consiguiéramos combinar esta geometría con la física en una imagen simple y consistente, nos veríamos obligados a abandonar la idea de la naturaleza euclidiana de nuestro espacio y buscar una representación más apropiada de la realidad, adoptando unas hipótesis más generales acerca de su carácter geométrico.

La necesidad de ello se puede ilustrar con un experimento ideal que demuestre que una física realmente relativista no puede estar basada en la geometría de Euclides. Nuestro razonamiento implicará resultados ya conocidos, respecto a SC inerciales y a la teoría de la relatividad restringida.

Imaginemos un enorme disco sobre el que se trazaron dos círculos Concéntricos, uno muy pequeño y el otro muy grande (fig. 71).

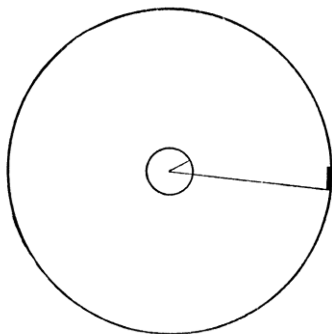


Fig. 71

El disco gira rápidamente respecto a un observador exterior. Admitamos que el SC de este observador sea inercial y que ha trazado dos circunferencias que permanecen en reposo en su SC, pero coinciden con las dos del disco en rotación. En su SC, que es inercial, vale la geometría euclidiana, de manera que comprobará la igualdad de los cocientes entre los radios y las respectivas circunferencias. ¿Qué dice al respecto un observador en reposo sobre el disco? Desde el punto de vista de la física clásica y también del de la relatividad restringida, su SC es un sistema prohibido. Si pretendemos encontrar nuevas formas para las leyes físicas, válidas en cualquier SC, debemos tratar al observador del disco con igual que al de fuera. Nosotros, del exterior, estamos siguiendo al observador interior en su tarea de medir las longitudes de las dos circunferencias y sus radios. Este emplea la misma barra métrica usada por el observador exterior al efectuar sus mediciones. "La misma barra" quiere decir, realmente, la que usó y le fue entregada por el observador de afuera o una de un par de barras que tienen la misma longitud en reposo en el SC exterior.

El observador que está sobre el disco empieza por determinar las longitudes de la circunferencia pequeña y la de su radio. El resultado que encuentra es el mismo que halló el otro observador, exterior. En efecto, ante todo suponemos que el eje de rotación del disco coincide con el centro de los círculos, como se ve en la figura.

Las partes próximas al eje tienen velocidades pequeñas. Por lo tanto, si el círculo es suficientemente pequeño es perfectamente factible aplicar la mecánica clásica. Esto significa que la barra tiene la misma longitud para ambos observadores; en consecuencia el resultado de las medidas será igual para los dos. Terminada esta operación el observador del disco-se dispone a medir la longitud del radio del círculo grande. Colocada sobre el radio, la barra se mueve respecto del observador exterior, pero su longitud permanece invariable, es decir, igual para ambos observadores, pues la dirección del movimiento es normal al radio. Así pues, tres medidas resultan iguales para los dos experimentadores, a saber: las de los dos radios y la de la circunferencia menor. ¡Pero no sucede lo mismo con la cuarta medida! La longitud de la circunferencia mayor será diferente. La barra puesta sobre la circunferencia (trazo grueso de la figura 71) en la dirección del movimiento, aparecerá, ahora, contraída para el observador en reposo. La velocidad sobre esta circunferencia es mucho mayor que la velocidad sobre el círculo interior y la contracción de longitud debe ser tenida en cuenta. Por eso, si se aplica la

teoría de la relatividad restringida llegamos a la conclusión siguiente: la longitud de la circunferencia mayor será diferente según la determine uno u otro de nuestros dos observadores. Como sólo una de las cuatro longitudes medidas por ambos experimentadores no es la misma para los dos, los cocientes entre los dos radios y las dos circunferencias no pueden ser iguales para un observador del disco si, como sabemos, lo son para el otro. Esto significa que un hombre sobre el disco en rotación no puede comprobar la validez de la geometría euclidiana en su SC.

Ante este resultado, el observador del disco podría decir que no desea considerar SC en los que no valga la geometría de Euclides. En efecto, la bancarrota de esta geometría se debe a la rotación absoluta del disco, al hecho de que su SC es inadecuado, prohibido. Pero al expresarse de esta manera rechaza la idea principal de la teoría general de la relatividad. Si, por el contrario, estamos decididos a descartar la posibilidad del movimiento absoluto y conservar la idea de una teoría general de la relatividad, entonces la física debe ser edificada sobre la base de una geometría más general que la de Euclides. No hay manera de eludir esta consecuencia si todos los SC son permitidos. Los cambios que trae aparejada la relatividad general no se limitan al concepto de espacio. En la relatividad restringida teníamos relojes en reposo, sincronizados en cada SC y con idéntica marcha, es decir, que indican el mismo tiempo simultáneamente. ¿Qué pasa con un reloj en un SC que no sea inercial? Para responder a esta pregunta, utilizaremos otra vez el experimento ideal del disco giratorio. El observador exterior tiene, en su SC inercial, relojes perfectos que tienen la misma marcha y están sincronizados entre sí. El experimentador del disco toma dos de esos relojes y coloca uno sobre la circunferencia pequeña y el otro en la periferia del círculo mayor. El reloj situado sobre la circunferencia interior tiene una velocidad muy pequeña en relación con el observador exterior; por ello se puede aceptar que su marcha será la misma que uno de los relojes en reposo fuera del disco. Pero el reloj puesto sobre la circunferencia grande tendrá una velocidad considerable, por lo cual su marcha será diferente de la de los relojes exteriores y también de la del otro reloj colocado sobre el círculo pequeño del disco. Luego, los dos relojes en rotación tendrán marchas distintas, y aplicando las consecuencias de la teoría de la relatividad restringida se ve, de nuevo, que en el SC giratorio no se pueden tomar las mismas disposiciones que en un SC inercial.

Para esclarecer las conclusiones que se pueden alcanzar de ésta y anteriores experiencias ideales, registremos una vez más un diálogo entre un físico viejo C, que cree en la física clásica, y uno moderno M, que conoce la teoría

general de la relatividad. C es el observador exterior, sobre el SC inercial; mientras que M está sobre el disco giratorio.

C. — En su SC, no es válida la geometría euclidiana. He observa- do sus mediciones y estoy de acuerdo en que, según ellas, la razón de las dos circunferencias no es igual a la razón de sus dos radios. Pero esto indica solamente que su SC es un sistema inadecuado, prohibido. En cambio, mi SC es de carácter inercial y puedo aplicar en él, con seguridad, la geometría euclidiana. Su disco está en movimiento absoluto y desde el punto de vista de la física clásica constituye un SC prohibido, en el cual no se cumplen las leyes de la mecánica.

M. — No me hable de movimiento absoluto. Mi SC es tan bueno como el suyo. Lo que yo vi fue que su SC giraba con respecto a mi disco. Nadie puede prohibirme referir todos los movimientos a mi SC.

C. — ¿Pero no sintió usted una extraña fuerza que lo trataba de alejar del centro del disco? Si éste no estuviera girando como un tiovivo, no hubiera usted observado esta fuerza radial ni la diferencia de cocientes de que hemos hablado anteriormente. ¿No son suficientes estos hechos para convencerle de que su SC está en movimiento absoluto?

M. — ¡De ninguna manera! He notado, es cierto, los dos hechos que usted menciona; pero creo que sobre mi disco actúa un extraño campo gravitatorio que es el causante de ambos. Este campo, dirigido hacia la periferia del disco, deforma mis barras rígidas y modifica la marcha de mis relojes. El campo gravitatorio, la geometría no euclidiana, relojes con marchas diferentes, son para mí hechos estrechamente relacionados. Al aceptar cualquier SC, debo, al mismo tiempo, suponer la existencia de un campo gravitatorio apropiado.

C. — ¿Se da usted cuenta de las dificultades causadas por la teoría general de la relatividad? Desearía hacerme entender claramente tomando un simple ejemplo no físico. Imagine una ciudad americana ideal, formada por calles paralelas y por avenidas también paralelas entre sí, pero perpendiculares a las calles. La distancia entre las calles y las avenidas es siempre la misma; luego, las manzanas son todas de igual área. De esta manera puedo individualizar cualquiera de ellas. Esta construcción sería imposible sin la geometría euclidiana. Así, por ejemplo, no podemos cubrir toda la Tierra con una sola y gran ciudad ideal, tipo americano. Un vistazo a un globo terráqueo le convencerá. Y tampoco sería posible cubrir vuestro disco con una ciudad de dicho tipo. Usted sostiene que sus barras son deformadas por un

campo gravitatorio. El hecho de que usted no pudiera confirmar el teorema de [Euclides de] la proporcionalidad entre los radios y las circunferencias respectivas, demuestra claramente que si usted lleva suficientemente lejos el plan de construcción de las calles y avenidas perpendiculares entre sí, tarde o temprano encontrará dificultades insalvables. En su disco giratorio la geometría se parece a la de una superficie curva, donde, naturalmente, no se puede llevar a cabo la construcción de dichas calles y avenidas, perpendiculares entre sí, sobre una parte suficientemente grande de la superficie. Para dar un ejemplo más físico, tomemos un plano irregularmente calentado, es decir, a temperaturas diferentes en distintas partes de su superficie. ¿Podría usted, con pequeños listones de hierro que se dilatan con los cambios de temperatura, efectuar la Construcción reticular representada en la figura 72?

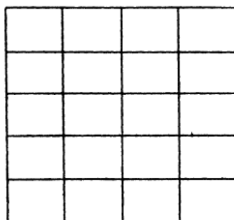


Fig. 72

¡Naturalmente que no! Su "campo gravitatorio" les juega las mismas tretas a las barras de su SC que la variación de temperatura a los listoncitos de hierro.

M. — No me asusta todo esto. Su construcción de calles y avenidas Perpendiculares entre sí hace falta para determinar las posiciones de los cuerpos y necesitamos los relojes para ordenar los acontecimientos en el tiempo. La ciudad no tiene que ser el tipo geométrico americano de la figura 72, puede ser, perfectamente, del tipo de la antigua ciudad europea. Imagine su ciudad construida sobre un material plástico al que después deformamos. Aun así, sería posible numerar las manzanas y distinguir las diversas calles y avenidas, aunque éstas no sean ya equidistantes ni rectas (fig. 73). Análogamente, sobre la Tierra, la longitud y latitud de un punto determinan su posición, aun cuando no haya una estructura del tipo, varias veces referido, de la "ciudad americana".

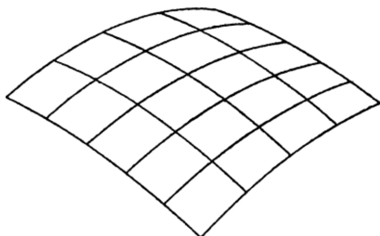


Fig. 73

C. — Pero aún veo una dificultad en el uso de su estructura tipo “antigua ciudad europea”. Estoy de acuerdo con que usted puede ordenar los puntos o los sucesos, pero la construcción embrollará las mediciones de las distancias. No le dará las *propiedades métricas* del espacio como ocurre con mi subdivisión. Tomemos un ejemplo. Yo sé que, en mi “ciudad americana”, para caminar diez manzanas tengo que recorrer una distancia doble a la de cinco manzanas. Sabiendo que todas las manzanas son iguales, la determinación de distancias me resulta inmediata.

M. — Esto es verdad. En mi “ciudad europea” no se pueden medir las distancias, directamente, por el número de manzanas deformadas. Debo conocer algo más; debo conocer las propiedades geométricas de la superficie sobre la cual se construyó la hipotética “ciudad europea”. Todo el mundo sabe que de 0° a 10º de longitud en el ecuador, no hay la misma distancia que entre 0º y 10° cerca del polo; todo navegante sabe cómo hallar las distancias entre dos de esos puntos de la Tierra porque conoce las propiedades geométricas de nuestro planeta; lo puede hacer mediante cálculos basados en la trigonometría esférica o experimentalmente, recorriendo con su barco dichas distancias a igual velocidad. En su caso todo ese problema resulta trivial porque las calles y las avenidas están igualmente separadas. En el caso de nuestra Tierra el asunto se complica, pues los meridianos 0º y 10º se cruzan en el polo y tienen el máximo de separación en el ecuador. Análogamente, en mi estructura tipo “ciudad europea” debo conocer algo más que usted en su estructura tipo “ciudad americana” para determinar distancias. Puedo adquirir este conocimiento adicional estudiando las propiedades geométricas de mi continuo en cada caso particular.

C. — Pero todo esto sirve, precisamente, para mostrar cuán complicado e inconveniente resulta reemplazar la estructura simple de la geometría euclidiana por la intrincada armazón que usted se ve obligado a usar. ¿Es esto realmente necesario?

M. — Me temo que sí, si queremos aplicar la física a cualquier SC, sin tener que depender del misterioso SC inercial. Admito que mi instrumento matemático es más complejo que el suyo; pero mis Suposiciones físicas son más simples y más naturales. La discusión se limitó a continuos bidimensionales. El asunto es más complicado en la teoría de la relatividad general, pues en ella debemos tratar con el continuo de cuatro dimensiones. No obstante, las ideas son las mismas que las que hemos esbozado con motivo del continuo bidimensional. En la relatividad general no se puede usar el andamio construido con barras rectas, paralelas y perpendiculares entre sí y relojes sincronizados como nos era permitido en la teoría de la relatividad restringida, pudiendo, sin embargo, ordenar puntos y sucesos con esas barras no euclidianas y con los relojes de marcha desigual. Pero medidas que requieran barras rígidas y relojes sincronizados y con marcha perfecta pueden sólo llevarse a cabo en un SC inercial de carácter local. Para éste es válida la teoría relativista restringida; pero nuestro SC "bueno" es sólo local, estando su naturaleza inercial confinada a un pequeño espacio y a un tiempo corto. Es factible predecir desde un SC arbitrario los resultados de las medidas y observaciones efectuadas en un SC inercial local; pero para esto es imprescindible conocer el carácter geométrico del continuo espacio-tiempo.

Los experimentos ideales que citamos sólo nos indican el carácter general de la nueva física relativista. Nos muestran que nuestro problema fundamental es el de la gravitación y que la relatividad generalizada conduce a una generalización muy amplia de los conceptos de tiempo y espacio.

LA RELATIVIDAD GENERAL Y SU VERIFICACIÓN

La teoría general de la relatividad intenta formular las leyes físicas para todos los SC, indistintamente. La gravitación es el problema fundamental de esta teoría. La relatividad constituye el r esfuerzo serio de reforma de la ley de la gravitación desde el tiempo de su descubrimiento por Newton. ¿Será esto realmente necesario?

Recapitulemos.

Ya hemos expuesto los éxitos de la teoría de Newton, que lugar al tremendo desarrollo de la astronomía basado sobre su de gravitación. Esta ley de Newton continúa aún siendo la base de todos los cálculos astronómicos.

Pero recordemos también las objeciones hechas a esta teoría. En efecto, la ley de Newton es da únicamente en los SC inerciales de la física clásica; SC definir por la condición de que para ellos deben valer las leyes de la mecánica. La fuerza entre dos masas depende de la distancia que las para. La relación entre la fuerza y la distancia es, como sabemos, invariante con respecto a la transformación clásica. Pero esta ley se ajusta al marco de la relatividad restringida, pues la distancia u es invariante respecto de la transformación de Lorentz. Podríamos tratar, como hicimos con tanto éxito con las leyes del movimiento de generalizar la ley de la gravitación de manera que se ajuste a teoría especial de la relatividad; o, en otras palabras, formularla de tal modo que resulte invariante respecto a la transformación de Lorentz y no a la transformación de Galileo. Pero esta ley de Newton resistió obstinadamente todos los esfuerzos hechos para simplificar- la y adaptarla a la teoría de la relatividad restringida. Aun cuando hubiéramos salido airosos de esta empresa, nos quedaría por dar, aún, un paso importante: el paso del SC inercial al SC arbitrario de la teoría de la relatividad general. Por otra parte, las experiencias ideales del ascensor muestran claramente que no sería posible la formulación de una teoría general de la relatividad sin resolver el problema de la gravedad. Y por esto vemos, asimismo, por qué la solución relativista del problema de la gravitación ha de ser distinta de la interpretación clásica.

Fiemos tratado de señalar, una vez más, el camino que conduce a la teoría de la relatividad general y las razones que nos fuerzan a modificar nuestro punto de vista anterior. Sin entrar en la estructura formal de la teoría, expondremos ciertos rasgos distintos de la nueva teoría de la gravitación en relación a la newtoniana. No debiera resultar muy difícil ver la naturaleza de estas diferencias, teniendo en cuenta lo expuesto hasta el momento:

1. Las ecuaciones gravitatorias de la teoría de la relatividad general pueden ser aplicadas a cualquier SC. La elección de un determinado SC para un caso dado es sólo una cuestión de conveniencia práctica. Teóricamente todos los SC son permitidos. En los casos en que la gravitación pueda ser despreciada encontraremos automáticamente las leyes de la relatividad restringida.
2. La ley de gravitación de Newton relaciona el movimiento de un cuerpo en un cierto lugar del espacio y en un determinado instante del tiempo, con la acción simultánea de otro cuerpo a cierta distancia (grande o pequeña) del primero. Esta es la ley que constituyo u verdadero modelo de todo el sistema conceptual mecanicista. Pero el punto de vista mecanicista se vino

abajo. Con las leyes de Maxwell se creó un nuevo modelo de ley natural. Las ecuaciones de Maxwell son estructurales. Como sabemos, relacionan sucesos que se producen "aquí' y "ahora" con sucesos que acontecerán un Poco más tarde en el entorno inmediato. Son las leyes que describen las variaciones del campo electromagnético. Las nuevas ecuaciones gravitatorias son también leyes estructurales que describen OS cambios del campo gravitatorio. Hablando esquemáticamente Podríamos decir: la transición de la ley de la gravitación de Newton a la relatividad general recuerda en algo el pasaje de la teoría de los fluidos eléctricos y de la ley de Coulomb a la teoría de Maxwell.

3. Nuestro mundo no es euclidiano. Su naturaleza geométrica está determina por la distribución de la materia y de su velocidad. Las ecuaciones gravitatorias de la teoría general de la relatividad tratan de revelar las propiedades geométricas del mundo. Supongamos, por el momento, que hubiéramos conseguido desarrollar el programa de la relatividad general. ¿No estamos en peligro de llevar la especulación demasiado lejos de la realidad? Sabemos con qué exactitud la teoría clásica explica las observaciones astronómicas. ¿Existe la posibilidad de tender un puente entre la nueva teoría y la observación? Toda especulación tiene que ser controlada por la experiencia, y la más hermosa de las teorías tiene que ser rechazada si no se ajusta a los hechos. ¿Cómo resistió la nueva teoría la prueba experimental? Esta pregunta se puede responder con una sola frase: la teoría de la gravitación de Newton un caso particular de la relativista. Si las fuerzas de gravitación son relativamente débiles, la antigua teoría newtoniana resulta una buena aproximación a las nuevas leyes de gravitación. Luego, todas las observaciones que confirman la teoría clásica confirman también la teoría relativista. Recuperamos la teoría anterior desde el nivel más elevado de la nueva.

Aun cuando no se pudieran encontrar observaciones adicionales en favor de la teoría relativista, si su explicación fuera sólo tan buena como la anterior, deberíamos decidirnos por ella. Las ecuaciones de esta teoría son más complicadas desde el punto de vista formal, pero sus hipótesis fundamentales son mucho más simples. En ellas han desaparecido los dos fantasmas terribles: el tiempo absoluto y el sistema inercial. La clave de la equivalencia entre la masa gravitatoria y la masa inerte no pasa inadvertida aquí. No hacen falta hipótesis sobre la dependencia de la fuerza de gravitación respecto de la distancia. Las ecuaciones gravitatorias tienen la forma de leyes de estructura,

forma requerida a toda ley física desde el gran descubrimiento de la teoría del campo.

Se pueden deducir, sin embargo, ciertas consecuencias nuevas de la teoría relativista de la gravitación. Una de ellas, la desviación de los rayos luminosos en un campo gravitatorio, ha sido citada ya. Vamos a mencionar a continuación otras dos consecuencias más.

Como ya dijimos, las ecuaciones relativistas se reducen a la ley de la gravitación de Newton para campos débiles; luego, para que aparezcan discrepancias con las leyes clásicas, deberemos considerar campos gravitatorios muy intensos. Tomemos nuestro sistema solar. Los planetas, la Tierra entre ellos, se mueven en órbitas elípticas alrededor del Sol. La atracción entre éste y Mercurio es mayor que la que existe entre él mismo y cualquier otro planeta, pues Mercurio es el planeta más cercano al astro central. Si existe alguna esperanza de encontrar una desviación de la ley de Newton, es en este planeta donde hay mayor probabilidad de hallarla. Según la gravitación universal clásica, la trayectoria de Mercurio debe ser de igual naturaleza que las de los demás planetas, con excepción de que está más próxima al Sol. La teoría de la relatividad predice, en cambio, que su trayectoria debe ser algo diferente, a saber: además del movimiento de traslación elíptico de Mercurio alrededor del Sol, la elipse, que constituye su trayectoria newtoniana, debería girar lentamente, respecto al SC unido rígidamente al Sol, dibujando como resultante la pintoresca trayectoria en roseta de la figura 74. Esta rotación de la elipse constituye el efecto nuevo predicho por la relatividad, que da también su magnitud. ¡La elipse de Mercurio efectuaría, según los cálculos relativistas, una rotación completa en tres millones de años! Se ve que el efecto es muy débil y pocas esperanzas habría de descubrirlo en planetas más alejados del Sol que Mercurio.

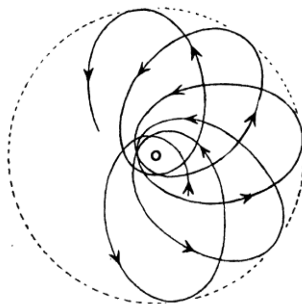


Fig. 74

La desviación del movimiento de Mercurio respecto a la elipse newtoniana era en realidad conocida con anterioridad a la formulación de la teoría de la relatividad, pero no tenía explicación alguna. Por otra parte, la teoría general de la relatividad fue desarrollada sin tener en cuenta este problema particular. No fue hasta después de formulada esta teoría cuando se dedujo de sus ecuaciones gravitatorias la rotación de la elipse newtoniana alrededor del Sol. En el caso de Mercurio la teoría explicó con éxito la discrepancia entre el movimiento real y el movimiento predicho por la ley de Newton.

Hay una conclusión más, deducida de la teoría general de la relatividad, que fue puesta a prueba por la experiencia. Antes hemos visto que un reloj, colocado sobre la circunferencia grande del disco giratorio, tiene una marcha distinta de otro igual colocado más cerca del eje de rotación. Análogamente, de la teoría relativista se deduce que un reloj situado en el Sol tiene una marcha diferente a la de otro reloj idéntico en la Tierra, pues el campo gravitatorio es más intenso en el Sol que en nuestro planeta.

Ya hemos indicado que el sodio incandescente emite una luz amarilla homogénea, o sea de una longitud de onda determinada. En esta radiación, el átomo revela uno de sus posibles ritmos; el átomo representa, por así decir, un reloj, y la longitud de onda emitida, uno de sus ritmos. Según la teoría de la relatividad generalizada, la longitud de onda de la luz emitida por el átomo de sodio, por ejemplo, colocado en el Sol, debiera ser algo mayor que la de la luz emitida por el mismo elemento sobre la Tierra.

El problema de comprobar experimentalmente las consecuencias de la teoría de la relatividad general es complicado y no está aún resueltos.[6] Como en esta exposición nos ocupamos sólo de las ideas principales, no intentaremos ir más lejos; y sólo nos resta decir que el veredicto experimental parece confirmar las nuevas conclusiones obtenidas de la teoría de la relatividad generalizada.

CAMPO Y MATERIA

Hemos visto cómo y por qué se vino abajo el punto de vista mecanicista. Fue imposible explicar todos los fenómenos basados en la acción de sencillas

---

[6] En los últimos veinte años la situación ha cambiado. Las mejoras introducidas en las técnicas experimentales y los nuevos descubrimientos en el terreno de la astrofísica han permitido mejorar la base experimental de la teoría general de la relatividad.

fuerzas de atracción y repulsión entre partículas inalterables. Nuestros primeros intentos de ir más allá de la concepción mecanicista, introduciendo el concepto de campo, tuvieron su mayor éxito en el dominio de los fenómenos electromagnéticos. Fueron así formuladas las leyes estructurales del campo electromagnético; leyes, volvemos a recordar, que relacionan sucesos muy próximos entre sí en el espacio y el tiempo. Estas leyes caben en el marco de la teoría de la relatividad restringida, pues son invariantes respecto de la transformación de Lorentz. Más tarde, la teoría general de la relatividad formuló las leyes de la gravitación, que también son estructurales, y que describen el campo gravitatorio entre partículas materiales. Se pudieron, también, generalizar las leyes de Maxwell, de manera que valieran en cualquier SC como sucede con las leyes relativistas de la gravitación.

Tenemos dos realidades: *materia y campo*. No hay duda de que en la actualidad no se puede concebir toda la física como edificada sobre el concepto de materia, tal como lo creían los físicos de principios del siglo pasado. Por el momento tenemos que aceptar ambos conceptos. ¿Pero podemos pensar que la materia y el campo son dos realidades completamente diferentes? Dada una pequeña partícula de materia podríamos, de una manera simplista, formarnos la imagen de la misma, suponiendo que existe una superficie bien definida donde la partícula deja de existir y donde aparece su campo gravitatorio. En esta imagen, la región en la cual son válidas las leyes del campo es separada bruscamente de la región en la que está presente la materia. Pero, ¿cuáles son los criterios que distinguen la materia del campo? Antes de haber estudiado la teoría de la relatividad pudiéramos haber intentado la respuesta siguiente:

La materia tiene masa y el campo no. O de otra manera: el campo representa energía y la materia representa masa. Pero ya sabemos que estas respuestas son insuficientes a la luz del conocimiento posteriormente adquirido. De la teoría de la relatividad sabemos que la materia representa enormes depósitos de energía y que la energía representa materia. No se puede, por este camino, distinguir cualitativamente entre materia y campo, pues la diferencia entre masa y energía tampoco es cualitativa. La materia es, con mucho, el mayor depósito de energía; pero el campo que envuelve la partícula representa también energía, aunque en una cantidad incomparablemente menor. Por esto se podría decir: la materia es el lugar donde la concentración de energía es muy grande y el campo es donde la concentración de energía es pequeña. Pero si éste es el caso, entonces la diferencia entre materia y campo es

sólo cuantitativa. No hay razón, entonces, para considerar la materia y el campo como dos cualidades esencialmente diferentes entre sí. No se puede imaginar una superficie nítida que separe el campo de la materia.

La misma dificultad se presenta para la carga eléctrica y su campo. Parece imposible dar un criterio cualitativo obvio para distinguir entre materia y campo o entre carga y campo.

Las leyes estructurales, es decir, las leyes de Maxwell y las gravitatorias, dejan de ser válidas para concentraciones de energías muy grandes; es decir, donde existen fuentes del campo o sea cargas eléctricas y materia. Pero, ¿no podríamos modificar nuestras ecuaciones de modo que valieran en todas partes, incluso en regiones donde la energía esté enormemente concentrada?

No podemos edificar la física únicamente sobre la base del concepto de materia. Pero la división entre materia y campo es, desde el descubrimiento de la equivalencia entre masa y energía, algo artificial y no claramente definido. ¿No sería factible desechar el concepto de materia y estructurar una física fundamentada sólo en el concepto del campo? Según esta concepción lo que impresiona nuestros sentidos como materia es, realmente, una enorme concentración de energía dentro de un volumen relativamente muy reducido. Podríamos considerar materia las regiones donde el campo es extremadamente intenso. De esta manera se crearía un nuevo panorama filosófico. Su misión y objetivo último sería la explicación de todos los fenómenos de la naturaleza por medio de leyes estructurales, válidas siempre y en todas partes. Desde este punto de vista, una piedra que cae sería un campo variable en el que los estados de máxima energía se desplazan por el espacio con la velocidad de la piedra. En una física tal no habría lugar para ambos conceptos, materia y campo; este último sería la única realidad. Esta nueva concepción nos es sugerida por el triunfo, sin precedente, de la física del campo, por el éxito alcanzado al expresar las leyes de la electricidad, magnetismo y gravitación en forma de leyes estructurales y, finalmente, por el descubrimiento de la equivalencia entre masa y energía. Nuestro problema último sería modificar las leyes del campo de tal modo que no dejen de valer en las regiones de concentración energética singular.

Pero todavía no se ha conseguido cumplir convincente y consistentemente con este programa. La decisión definitiva de su posibilidad corresponde al futuro. Hoy debemos admitir en todas nuestras construcciones teóricas las dos realidades: campo y materia.

Quedan aún ante nosotros problemas fundamentales. Sabemos que toda materia está edificada sobre una pequeña variedad de partículas. ¿Cómo son

las diversas formas de la materia construida a partir de esas partículas elementales? ¿Cómo interaccionan esas partículas elementales con el campo? En la busca de una respuesta a estas cuestiones se han introducido en la física nuevas ideas, las cuales constituyen los principios de la teoría de los cuantos.

RESUMEN

Un nuevo concepto aparece en la física, la invención más importante a partir de la época de Newton: el campo. Fue precisa una aguda imaginación científica para darse cuenta de que no eran las cargas ni las partículas, sino el campo existente entre ellas, lo esencial en la descripción de los fenómenos físicos. El concepto de campo resulta de una eficacia inesperada, dando origen a la formulación de las ecuaciones de Maxwell, que describen la estructura del campo electromagnético, gobernando al mismo tiempo los fenómenos eléctricos y los ópticos.

La teoría de la relatividad se origina en los problemas del campo. Las contradicciones e inconsistencias de las teorías clásicas nos obligan a adjudicar nuevas propiedades al continuo espacio-tiempo, al escenario de todos los acontecimientos de nuestro mundo físico.

La teoría de la relatividad se desarrolla en dos etapas. La primera conduce a la llamada teoría de la relatividad restringida o especial que se aplica sólo a sistemas inerciales de coordenadas, esto es, a sistemas en los que es válido el principio de inercia como lo formulara Newton. Esta teoría relativista restringida se basa sobre dos suposiciones fundamentales, a saber: las leyes físicas son las mismas en todos los sistemas de coordenadas en movimiento uniforme relativo entre sí; y la velocidad de la luz tiene siempre el mismo valor. De estos postulados, completamente confirmados por las experiencias, han sido deducidas las propiedades de barras y relojes en movimiento, su cambio de longitud y de marcha en función de la velocidad. Esta teoría modifica las leyes de la mecánica. Las leyes clásicas no se cumplen si la velocidad de la partícula móvil se aproxima a la de la luz. Las nuevas leyes relativistas del movimiento de los cuerpos han sido espléndidamente confirmadas por la experiencia. Otra consecuencia de la teoría (especial) de la relatividad es la relación entre masa y energía. La masa es energía y la energía tiene masa. Los dos principios de conservación de masa y de energía son combinados por la teoría de la relatividad en un solo principio, el de la conservación de la masa-energía.

La teoría general de la relatividad da un análisis aún más profundo del continuo espacio-tiempo. La validez de esta teoría ya no está restringida a los sistemas inerciales de coordenadas. Ataca el problema de la gravitación y formula nuevas leyes que dan la estructura del campo gravitatorio. Nos induce a analizar el papel que desempeña la geometría en la descripción del mundo físico. Considera la equivalencia entre la masa inerte y la masa gravitatoria como una clave esencial y no como una coincidencia accidental, según era considerada en la mecánica clásica. Las consecuencias experimentales de la teoría de la relatividad generalizada difieren s levemente de la mecánica clásica y han concordado con la experiencia cada vez que se pudo establecer la prueba. Pero el valor de la teoría reside en su coherencia interna y en la simplicidad de sus hipótesis fundamentales.

La teoría de la relatividad acentúa la importancia del concepto del campo en la física. Pero todavía no se ha conseguido formular una física de campos pura. Por ahora debemos admitir, aún, la existencia de ambos: campo y materia.

4. LOS CUANTOS

CONTINUIDAD Y DISCONTINUIDAD

Supongamos que tenemos ante nosotros un mapa de la ciudad de Barcelona y sus alrededores. Nos preguntamos: ¿a qué puntos de este mapa puede llegarse en tren? Con una guía de ferrocarril a mano, nos será fácil hallarlos y marcarlos en el mapa. Preguntémonos ahora: ¿a qué puntos se podrá llegar viajando en coche? Si se trazan, sobre el mismo mapa, líneas que representen todos los caminos que desembocan en Barcelona, puede llegarse en automóvil a cada uno de sus puntos. En ambos casos tenemos conjuntos de puntos. En el primero, los puntos señalados están separados entre sí y representan estaciones de ferrocarril; en el segundo, son todos los puntos de las líneas que representan caminos. Ahora bien, quisiéramos saber a qué distancia de Barcelona está cada uno de esos puntos o, para ser más exactos, deseamos conocer su distancia respecto de determinado lugar de la ciudad. Estas distancias pueden hallarse fácilmente en el mapa si viene acompañado de la escala a que fue dibujado. Obtendremos, así, en el caso de las estaciones, números que representarán la distancia de cada una de ellas al lugar en cuestión. Estos números cambian de valor de manera irregular, por saltos o tramos finitos. Lo cual se expresa diciendo: las distancias de Barcelona a los lugares accesibles en tren varían de manera discontinua. Los lugares a que es posible llegar en automóvil cambian en cantidades tan pequeñas como se quiera; es decir, varían de manera continua. El aumento o disminución del camino recorrido se puede hacer tan pequeño como se quiera yendo en automóvil, pero no viajando en tren.

La producción de una mina de carbón puede variar de modo continuo; es decir, es posible aumentar o disminuir el total de carbón producido en cantidades arbitrariamente pequeñas. Pero el número de empleados puede sólo cambiar discontinuamente. No tiene, evidentemente, sentido, decir: “desde ayer, el número de obreros ha aumentado en 3,78”

Si se le pregunta a una persona cuánto dinero lleva consigo, podrá dar un número que contenga únicamente dos decimales. Una suma de dinero puede sólo variar por saltos, discontinuamente. En España la moneda mínima o,

como lo llamaremos, el “cuanto elemental” del dinero español, es “un céntimo”. El “cuanto elemental” del dinero francés es “un céntimo”, cuyo valor es actualmente algo menos de veinte veces más del cuanto español. En este ejemplo tenemos dos cuantos elementales cuyos valores pueden compararse entre sí. La relación de sus valores tiene un sentido preciso, pues uno de ellos vale unas veinte veces más que el otro.

Se puede afirmar, entonces, que ciertas magnitudes cambian de una manera continua y otras discontinuamente, o sea, por cantidades que no se pueden reducir indefinidamente. Estos pasos indivisibles, mínimos, se llaman los *cuantos elementales* de la magnitud en cuestión.

Al pesar grandes cantidades de arena, se pueden considerar sus masas como continuas aunque su composición granular es evidente. Pero si la arena se hiciera muy cara, y las balanzas empleadas para pesarla fueran muy sensibles, nos veríamos obligados a tener en cuenta el hecho de que su masa tiene que cambiar indefectiblemente por un número entero de granos. La masa de uno de estos granos sería en este caso el cuanto elemental. De este ejemplo se ve cómo al aumentar la precisión de nuestras medidas, se puede descubrir que cierta magnitud, considerada hasta el momento como continua, tiene en realidad una estructura discontinua.

Si tuviéramos que sintetizar la idea principal de la teoría de los cuantos en una sola frase, diríamos: *se debe admitir que ciertas magnitudes físicas consideradas hasta el presente como continuas están compuestas de cuantos elementales.*

El número de hechos que abarca la teoría de los cuantos es tremendamente grande. Estos hechos han sido descubiertos por la técnica altamente refinada de la experimentación moderna. Como no nos será posible mostrar ni describir siquiera los experimentos básicos, tendremos que citar a menudo sus resultados dogmáticamente. Nuestro objeto es explicar solamente las ideas fundamentales.

LOS CUANTOS ELEMENTALES DE MATERIA Y ELECTRICIDAD

Según la teoría cinética de la materia, todos los elementos están compuestos de un gran número de moléculas. Tomemos el caso más sencillo, el del elemento más liviano, el hidrógeno. En la página 47 vimos cómo el estudio del movimiento browniano llevó a la de terminación de la masa de una molécula de hidrógeno. Su valor es:

0,000 000 000 000 000 000 000 003 3 gramos.

Esto significa que la masa es discontinua. La masa de una porción de hidrógeno puede, según esto, variar únicamente en un número entero de cierta cantidad mínima que corresponde a la masa de una molécula de este gas. Pero los procesos químicos enseñan que la molécula de hidrógeno puede ser dividida en dos partes, o en otras palabras, que la molécula de hidrógeno está compuesta de dos átomos. En los procesos químicos, es el átomo, y no la molécula, el que desempeña el papel de cuanto elemental. Dividiendo el número anterior por dos, se obtiene la masa de un átomo de hidrógeno. Esta vale, aproximadamente:

0,000 000 000 000 000 000 000 001 7 gramos.

La masa es, pues, una magnitud discontinua. Pero no tenemos que preocuparnos de ello, naturalmente, al efectuar una pesada. Aun la más sensible de las balanzas está muy lejos de alcanzar el grado de sensibilidad que pueda poner de manifiesto la discontinuidad en la variación de la masa.

Consideremos, ahora, el caso ya tratado de un conductor unido a una fuente eléctrica. Sabemos que es recorrido por una corriente de electricidad que circula del potencial más alto al potencial más bajo. Recordemos que la sencilla teoría de los fluidos eléctricos explica muchos hechos experimentales. Recordemos también (página 63) que si nos inclinamos por la primera de las dos posibilidades siguientes, a saber: que el fluido positivo se mueve del potencial mayor al menor, o que el fluido negativo se desplaza del potencial menor al mayor, fue, simplemente, una convención. Dejemos de lado, por el momento, todo el progreso procedente de la introducción de los conceptos de campo. Aun pensando en la imagen de los fluidos, quedan, sin embargo, por resolver algunos puntos interesantes.

Tal como sugiere la palabra “fluido”, la electricidad fue considerada, en un principio, como una magnitud continua. El valor de la carga podía variar, según dicho punto de vista, en cantidades o pasos arbitrariamente pequeños. No fue necesario admitir la existencia de cuantos elementales de electricidad. El éxito de la teoría cinética de la materia nos sugiere la siguiente cuestión: ¿existen cuantos elementales de electricidad? Otro asunto que queda por resolver es el siguiente: ¿consiste la corriente eléctrica en un flujo de fluido positivo, negativo o de ambos, tal vez?

La idea básica de las investigaciones efectuadas con el fin de encontrar una respuesta a las cuestiones planteadas consiste en independizar el fluido

eléctrico del alambre conductor, hacerlo viajar por el espacio vacío, despojarlo de toda relación con la materia y, entonces, investigar sus propiedades, que deben aparecer, bajo tales condiciones, con la máxima claridad. Durante el siglo XIX se efectuaron muchas experiencias de este tipo. Antes de explicar la idea de los dispositivos experimentales, citaremos, por lo menos en un caso, los resultados obtenidos. El fluido eléctrico que se mueve por el conductor es negativo, dirigido, por lo tanto, del potencial menor al potencial mayor. Si se hubiera sabido esto desde un principio, cuando se formuló la teoría de los fluidos, seguramente se habrían intercambiado las denominaciones, llamando positiva a la electricidad de la barra de caucho y negativa a la carga de la barra de vidrio. Hubiera sido entonces más conveniente considerar como positivo el fluido que circula por el conductor.

Como nuestra primera suposición fue errónea, debemos afrontar sus inconvenientes. La próxima cuestión de importancia consiste en determinar si la estructura de este fluido negativo es "granular", es decir, si está o no compuesta de cuantos de electricidad. Un número de investigaciones experimentales independientes entre sí muestra, sin lugar a dudas, que existe un cuanto elemental de electricidad negativa. El fluido eléctrico negativo tiene estructura granular, exactamente como una playa se compone de granos de arena y una casa está construida de ladrillos. Este resultado fue formulado con la mayor claridad por J. J. Thomson a finales del siglo pasado. Los cuantos elementales de electricidad negativa se llaman electrones. En otras palabras, toda carga eléctrica negativa se compone de un gran número de cargas elementales iguales, los *electrones*. La carga negativa puede, como la masa, variar sólo de una manera discontinua. La carga eléctrica elemental es, sin embargo, tan pequeña, que en muchas investigaciones resulta igualmente posible y a veces hasta más conveniente considerarla como una magnitud continua. Así pues, las teorías atómica y electrónica introducen en la ciencia magnitudes físicas discontinuas que pueden variar, únicamente, por saltos.

Imaginemos dos placas metálicas paralelas situadas en el vacío. Una de las placas tiene una carga positiva, la otra negativa. Una carga positiva de prueba colocada entre las dos placas será repelida por la placa positiva y será atraída por la negativa. Así pues, las líneas de fuerza del campo eléctrico entre las placas se dirigirán de la que posee carga positiva hacia la que posee carga negativa (v. fig. 75). La fuerza que actuaría sobre una carga de prueba negativa tendría sentido opuesto. Si las placas son suficientemente grandes, las líneas de fuerza, entre ellas, tendrán en todas partes la misma densidad; en este caso resulta indiferente la posición de la carga de prueba; la fuerza, y por

lo tanto la densidad de las líneas de fuerza, será la misma. Los electrones introducidos entre las placas se comportarán como las gotas de una lluvia en el campo gravitatorio de la Tierra, moviéndose paralelamente entre sí, de la placa negativa hacia la placa positiva.

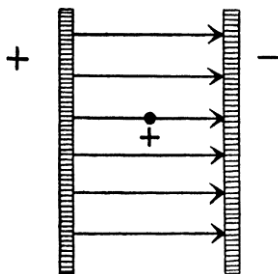


Fig. 75

Se conocen muchos dispositivos experimentales que permiten introducir un flujo de electrones dentro de tal campo, que los dirige a todos del mismo modo. Uno de los más simples consiste en disponer entre dichas placas un alambre suficientemente calentado. Este conductor emite electrones que son, entonces, dirigidos por las líneas de fuerza del campo existente entre las placas. Por ejemplo, las válvulas radiotelefónicas, tan familiares a todo el mundo, se basan en este principio.

Se han llevado a cabo muchos y muy ingeniosos experimentos con haces de electrones libres. Se han estudiado los cambios de sus trayectorias bajo la acción de campos eléctricos y magnéticos exteriores. Ha sido hasta posible aislar un solo electrón y determinar, así, su carga elemental y su masa, esto es, su resistencia inercial a la influencia de fuerzas exteriores. Aquí citaremos únicamente el valor de su masa, que resulta ser, aproximadamente, *dos mil veces menor* que la masa de un átomo de hidrógeno. Es decir, la masa de un átomo de hidrógeno, que es ya tan pequeña, resulta grande en comparación con la masa del electrón. Desde el punto de vista de una teoría del campo consistente, toda la masa, es decir, toda la energía de un electrón, es la energía de su campo; casi todo su valor está concentrado en una esfera muy pequeña (el volumen del electrón) donde adquiere el máximo de intensidad. Esta intensidad disminuye rápidamente al alejarnos del "centro" del electrón.

Hemos dicho antes que el átomo de todo elemento constituye su cuanto elemental mínimo. Esto se creyó durante mucho tiempo. Actualmente ya no es así. La ciencia ha formado una imagen nueva que muestra las limitaciones de la anterior. Difícilmente hay en la física una conclusión más firmemente

fundada en los hechos que la que sostiene la complejidad de la estructura atómica. Primero se llegó al convencimiento de que el electrón, el cuanto elemental de fluido eléctrico negativo, es uno de los componentes del átomo, uno de los ladrillos elementales que entra en la edificación de toda materia. El caso anteriormente citado de la emisión de electrones por un metal incandescente es sólo uno de los numerosos procedimientos de extraer electrones del seno de la materia. Este resultado, que relaciona el problema de la estructura de la materia con la electricidad, es consecuencia indudable de múltiples e independientes hechos experimentales.

Es relativamente fácil extraer de un átomo alguno de los electrones que entran en su constitución. Esto se puede efectuar por medio del calor, como en el caso del alambre calentado y de manera distinta, como, por ejemplo, bombardeando los átomos con otros electrones.

Supongamos que se introduce un alambre fino y calentado al rojo en un recipiente que contiene hidrógeno enrarecido. El alambre emitirá electrones en todas las direcciones. Bajo la acción de un campo eléctrico apropiado adquirirán cierta velocidad. Un electrón, bajo la acción de un campo eléctrico constante, va aumentando su velocidad como un cuerpo que cae en un campo gravitatorio. Por este método se puede pues conseguir que un haz de electrones se mueva en una dirección y con una velocidad determinadas. Actualmente podemos hacer que los electrones alcancen velocidades del orden de la de la luz, poniéndolos bajo la acción de campos intensísimos. ¿Qué sucede cuando un haz de electrones de cierta velocidad alcanza las moléculas del hidrógeno enrarecido? El choque de un electrón de velocidad suficiente no sólo podrá dividir la molécula de hidrógeno de nuestro ejemplo en sus dos átomos, sino, además, arrancar un electrón a uno de éstos.

Aceptemos el hecho de que los electrones sean constituyentes de la materia. Entonces, un átomo al que se hubiera despojado de un electrón no puede ser eléctricamente neutro. Pues si lo era previamente, no es posible que lo sea faltándole un electrón, o sea, disminuyendo su carga negativa en una carga elemental. El resto del átomo debe poseer un exceso de carga positiva. Por otra parte, como la masa de un electrón es mucho menor que la del átomo más ligero, se puede deducir, con seguridad, que la mayor parte de la masa atómica no está representada por sus electrones, sino por las restantes partículas elementales que son mucho más pesadas. Se llama *núcleo* a la parte pesada de cada átomo.

La técnica moderna ha creado métodos que permiten dividir el núcleo atómico, transformar los átomos de un elemento en los de otro y extraer del

núcleo las diversas partículas elementales pesadas que lo constituyen. Este capítulo de la física conocido como “Física nuclear”, al que tanto contribuyó Rutherford, es el más interesante desde el punto de vista experimental. Pero no tenemos, todavía, una teoría que sea simple en sus ideas fundamentales y que explique la riqueza y variedad de los hechos de la física nuclear. Como en estas páginas nos ocupamos únicamente de las ideas físicas generales, omitiremos este capítulo a pesar de su gran importancia para la física moderna.

LOS CUANTOS DE LUZ

Consideremos una pared que se extendiera a lo largo de la Costa. Las olas del mar la golpean continuamente. Cada una de las olas que llega, se lleva una pequeñísima parte de su superficie. La masa de la pared decrece, en consecuencia, con el tiempo y al cabo de un año, pongamos por caso, la pared habrá perdido un peso determinado. Imaginemos, ahora, un proceso diferente. Se quiere disminuir la masa de la pared en una cantidad igual a la perdida por la abrasión de las olas durante un año, pero por un procedimiento distinto: disparando contra la pared y desprendiendo, así, pequeños trozos de su superficie en los lugares de impacto de los proyectiles. Su masa disminuirá, evidentemente, y se puede perfectamente imaginar que se consiga la misma reducción total de la masa en ambos casos. De la apariencia de la pared se podría descubrir, sin embargo, si actuaron las olas continuas del mar o la lluvia discontinua de proyectiles. Para comprender mejor los fenómenos que vamos a describir a continuación, resultará útil recordar la diferencia entre las olas del mar y un haz de proyectiles.

Ya hemos dicho que un metal, un alambre incandescente, emite electrones. Aquí presentaremos un modo distinto de extraer electrones de los metales. Supongamos que sobre la superficie de un metal incida luz homogénea de color violeta, es decir, luz de una longitud de onda definida. Se observa que la luz extrae electrones del metal, que se alejan de su superficie con una velocidad determinada. Desde el punto de vista del principio de la conservación de la energía se puede decir: la energía de la luz incidente es parcialmente transformada en energía cinética de los electrones expelidos. La técnica experimental moderna nos permite registrar la presencia de esos proyec-

tiles-electrones, determinar su velocidad y por ende su energía. Esta extracción de electrones de un metal por la luz que incide sobre el mismo se llama *efecto fotoeléctrico*.

Nuestro punto de partida era la acción de una onda luminosa homogénea de cierta intensidad. Como en toda investigación experimental, debemos cambiar las condiciones y ver qué influencia producen sobre el efecto observado.

Empecemos variando la intensidad de la luz violeta homogénea con la que iluminamos nuestro metal y averigüemos cómo depende de ella la energía de los electrones arrancados. Tratemos de encontrar la respuesta razonando en vez de buscarla directamente por vía experimental. Podríamos argumentar así: en el efecto fotoeléctrico una fracción definida de la energía de la radiación luminosa se transforma en energía de movimiento de los electrones. Si se ilumina la misma superficie metálica con luz de igual longitud de onda pero procedente de una fuente más intensa, entonces la energía de los electrones debe ser mayor, ya que la radiación es más energética. Debemos, por lo tanto, esperar que la velocidad de los electrones aumente al aumentar la intensidad de la luz incidente. Pero la experiencia contradice nuestra predicción. Una vez más, vemos que las leyes naturales no son como desearíamos que fueran. Estamos frente a una experiencia que, al contradecir nuestras predicciones, echa abajo la teoría sobre la que éstas se basan. El resultado experimental obtenido es, desde el punto de vista de la teoría ondulatoria, sencillamente asombroso. Los electrones emitidos tienen todos, la misma velocidad, la misma energía, que no cambia al aumentar la intensidad de la luz incidente.

Este resultado experimental no pudo haber sido previsto por la teoría ondulatoria. Es por ello que nace aquí una nueva teoría como consecuencia del conflicto entre la vieja teoría y la experiencia.

Seamos deliberadamente injustos con la teoría ondulatoria de la luz, olvidando su gran conquista, la espléndida explicación de la difracción de la luz, o sea, su capacidad de bordear un pequeño obstáculo. Puesta nuestra atención en el fenómeno fotoeléctrico, pidámosle a la teoría una explicación adecuada. Evidentemente, no resulta posible deducir de la teoría ondulatoria la independencia observada de la energía de los electrones respecto de la intensidad de la luz que causa su expulsión del metal. Por esto, buscaremos una nueva teoría. Recordemos que la teoría corpuscular de la luz debida a Newton, que explica un gran número de fenómenos luminosos, fracasó ante la propiedad

de la luz de rodear un obstáculo, fenómeno que ahora dejamos de lado deliberadamente. En la época de Newton no existía el concepto de energía. Los corpúsculos luminosos eran, según Newton, imponderables; cada color conservaba su propio carácter de sustancia. Más adelante, cuando se creó el concepto de energía y se reconoció que la luz transporta energía consigo, nadie pensó en aplicar estos conceptos a la teoría corpuscular de la luz. La teoría de Newton estaba muerta y nadie tomó en serio su resurrección hasta nuestro siglo.

Con el objeto de conservar la idea principal de la teoría de Newton, debemos suponer que la luz homogénea está compuesta de granos de energía, y reemplazar los antiguos corpúsculos luminosos Por cuantos de luz, que llamaremos *fotones*, pequeñas porciones de energía que viajan por el espacio vacío con la velocidad de la luz. El renacimiento de la teoría de Newton en esta forma nueva conduce la *teoría cuántica de la luz*. No sólo la materia y la carga eléctrica, Sino también la energía de la radiación tienen una estructura granular, es decir, que está formada por cuantos de luz. Juntamente con los cuantos de materia y electricidad tenemos, también, los cuantos de energía.

La idea de los cuantos de energía fue primeramente introducida por Planck a principios del presente siglo con el objeto de explicar ciertos efectos mucho más complicados que el efecto fotoeléctrico. Pero el efecto fotoeléctrico enseña, con la máxima claridad y simplicidad, la necesidad de modificar nuestros conceptos anteriores.

Se ve en seguida que la teoría cuántica de la luz explica el efecto fotoeléctrico. Un haz de fotones cae sobre una placa metálica. La interacción entre la materia y la radiación consiste aquí en numerosos procesos individuales en cada uno de los cuales un fotón choca contra un átomo y le arranca un electrón. Todos los procesos individuales son análogos y el electrón extraído tendrá la misma energía en todos los casos. También se entiende que aumentar la intensidad de los haces luminosos significa, en el nuevo lenguaje, aumentar el número de fotones incidentes. En este último caso el número de electrones arrancados del metal debe aumentar, pero la energía de cada uno de ellos no cambiará. Se ve, pues, que esta teoría está en perfecto acuerdo con la observación.

¿Qué sucederá si incide sobre la superficie del metal una luz homogénea de color diferente, por ejemplo, de color rojo en lugar de violeta? Dejemos que la experiencia responda a este interrogante, para lo cual hay que medir la energía de los electrones extraídos por la luz roja y compararla con la energía de los electrones arrancados por la luz violeta. Se encuentra así que la energía

de los primeros es menor que la de los segundos. Esto significa que la energía de los cuantos de luz es distinta para distintos colores. En particular resulta que la energía de los fotones del color rojo es igual a la mitad de la energía de los fotones correspondientes al violeta. O más rigurosamente: la energía de un cuanto de luz, correspondiente a un color homogéneo, decrece proporcionalmente al aumento de la longitud de onda correspondiente. Existe una diferencia esencial entre los cuantos de energía y los cuantos de electricidad. Los cuantos de luz difieren para cada longitud de onda, mientras que los cuantos de electricidad son siempre los mismos. Si tuviéramos que usar una de las analogías anteriores, compararíamos los cuantos luminosos con los cuantos monetarios mínimos, que varían de país en país.

Continuemos descartando la teoría ondulatoria de la luz y admitamos que la estructura de la luz es granular, o sea, como ya dijimos que está formada por cuantos luminosos, esto es, fotones que se mueven en el vacío con una velocidad de, aproximadamente, 300.000 kilómetros por segundo. Luego, en nuestra nueva imagen, la luz es una lluvia de fotones, siendo el fotón el cuanto elemental de energía luminosa. Pero si se descarta la teoría ondulatoria, ¿qué nuevo concepto ocupa su lugar? ¡La energía de los cuantos de luz! Las conclusiones expresadas en la terminología de la teoría ondulatoria pueden ser traducidas al lenguaje de la teoría cuántica de la radiación. Por ejemplo:

Terminología de la teoría ondulatoria:

Una luz homogénea tiene una longitud de onda determinada. La longitud de onda del extremo rojo del espectro visible es el doble de la del extremo violeta.

Terminología de la teoría cuántica:

Una luz homogénea contiene fotones de una determinada energía. La energía de un fotón del extremo rojo del espectro visible es la mitad de la de un fotón del extremo violeta.

El estado de la cuestión puede ser resumido de la siguiente manera: hay fenómenos que pueden ser explicados por la teoría cuántica y no por la teoría ondulatoria. El efecto fotoeléctrico constituye uno de estos casos, conociéndose otros fenómenos de esta clase. Hay fenómenos que pueden ser explicados por la teoría ondulatoria, pero no por la teoría cuántica. La propiedad de la luz de bordear un obstáculo es un ejemplo típico de estos últimos. Finalmente, hay fenómenos, tales como la propagación rectilínea de la luz, que pueden ser explicados perfectamente por ambas teorías.

Pero, entonces, ¿qué es realmente la luz? ¿Es una onda o una lluvia de fotones? Ya nos planteamos antes una pregunta similar cuando nos preguntábamos: ¿Es la luz una onda o una lluvia de corpúsculos luminosos? Dimos la razón a la teoría ondulatoria porque cubría todos los fenómenos conocidos, haciendo que se abandonara el punto de vista corpuscular. Ahora, en cambio, el problema es mucho más complicado. No parece existir la posibilidad de ofrecer una descripción basada en uno solo de los lenguajes. Parece como si debiéramos usar a veces una teoría y a veces otra mientras que en ocasiones se puede emplear cualquiera de las dos. Estamos enfrentados con una nueva clase de dificultad. Tenemos dos imágenes contradictorias de la realidad; separadamente ninguna de ellas explica la totalidad de los fenómenos luminosos, pero juntas, sí.

¿Cómo es posible combinar estas dos imágenes? ¿Cómo podemos entender estos dos aspectos diametralmente opuestos de la luz? No es tarea fácil la solución de esta nueva dificultad. Estamos en presencia, otra vez, de un problema fundamental.

Aceptemos, por el momento, la teoría de los fotones y tratemos, con su ayuda, de comprender los hechos explicados hasta el presente por la teoría ondulatoria. De este modo acentuaremos las dificultades que hacen que las dos teorías aparezcan, a primera vista, como irreconciliables.

Recordemos: un haz de luz homogénea que pasa a través de un orificio hecho con la punta de un alfiler forma, sobre una pantalla, anillos concéntricos luminosos y oscuros (pág. 88). ¿Cómo es posible entender este fenómeno con la ayuda de la teoría de los cuantos de luz, descartando la teoría ondulatoria? Supongamos que un fotón se dirige hacia el orificio. Podríamos esperar que la pantalla aparezca iluminada si el fotón pasa por él y aparezca oscura si no lo atraviesa. En lugar de esto encontramos anillos brillantes y oscuros. Podríamos tratar de dar cuenta de este fenómeno como sigue: tal vez haya cierta interacción entre el borde del orificio y el fotón que sea la causa de la aparición de los anillos de difracción. Esto puede muy difícilmente ser considerado como una explicación. En el mejor de los casos expresa un programa de trabajo para su interpretación, dando, al menos, una ligera esperanza de que en el futuro sea factible entender la difracción como una consecuencia de la interacción entre la materia y los fotones.

Pero aun esta misma tenue esperanza se estrella contra los resultados de otra experiencia que referimos también anteriormente. Supongamos que en lugar de un orificio tenemos dos de ellos. La luz homogénea que pasa por los dos, da franjas luminosas y oscuras.

¿Cómo es posible interpretar este efecto desde el punto de vista de la teoría cuántica de la luz? Se puede argüir así: un mismo fotón pasa por uno cualquiera de los dos orificios. Pero si un fotón de un haz homogéneo representa una partícula luminosa elemental, resulta muy difícil imaginar su división y su paso por los dos orificios. Pero entonces, el efecto habría de ser exactamente igual que en el caso anterior, es decir, tendrían que aparecer anillos luminosos y oscuros en vez de franjas. ¿Cómo es posible que la presencia de otro orificio modifique completamente el efecto? ¡Aparentemente, el orificio por el cual no pasa el fotón, aun estando a una distancia apreciable del otro, influye en el fenómeno y transforma los anillos en franjas! Pues si el fotón se comporta como un corpúsculo de la física clásica debe atravesar sólo una de las dos aberturas. Pero si es así, el fenómeno de difracción parece completamente incomprensible.

La ciencia nos obliga a crear nuevas ideas, nuevas teorías. Su finalidad es la de destruir el muro de contradicciones que frecuentemente bloquea el camino del progreso científico. Todas las ideas esenciales de la ciencia han nacido de un conflicto dramático entre la realidad y nuestros deseos de comprenderla. Aquí tenemos otra vez un problema para cuya solución se requieren nuevos principios. Antes de tratar de dar cuenta de los intentos de la física moderna para explicar las contradicciones entre los aspectos cuántico y ondulatorio de la luz, mostraremos que se encuentra exactamente la misma dificultad al tratar con los cuantos de materia en lugar de los cuantos de luz.

LOS ESPECTROS DE RAYAS

Ya sabemos que toda la materia está formada de unas pocas clases de partículas. Los electrones han sido las primeras partículas elementales de la materia que se han descubierto. Pero los electrones son también los cuantos elementales de electricidad negativa. Hemos visto, además, que ciertos fenómenos nos obligan a admitir que la luz está compuesta de cuantos elementales distintos para distintas longitudes de onda. Antes de seguir adelante con el problema planteado debemos discutir ciertos fenómenos físicos en los que tanto la materia como la radiación desempeñan un papel esencial.

El Sol emite una radiación que puede ser descompuesta en sus componentes por un prisma. Así se obtiene el espectro continuo de la luz solar, en el que están representadas todas las longitudes de onda comprendidas entre las que corresponden a los dos extremos de su parte visible. Tomemos otro

ejemplo. Ha sido previamente mencionado el hecho de que el sodio incandescente emite luz homogénea, luz de un solo color o de una longitud de onda. Si se hace pasar la luz del sodio incandescente por un prisma se observa una sola línea amarilla. En general, si se coloca un cuerpo incandescente delante de un prisma la luz que emite es descompuesta, al atravesarlo, en sus componentes homogéneos, revelando el espectro característico del cuerpo emisor.

La descarga de la electricidad en un tubo que contiene un gas constituye una fuente luminosa, como la de los tubos luminosos de neón usados con fines de propaganda comercial. Supongamos que uno de esos tubos sea puesto frente a la abertura de un espectroscopio. El espectroscopio es un instrumento que actúa como un prisma pero con mucha mayor precisión y sensibilidad; divide la luz en sus componentes, esto es, la analiza. La luz solar vista a través de un espectroscopio da un espectro continuo; todas las longitudes de onda están representadas en él. Si la fuente de la luz es una descarga eléctrica a través de un gas, el espectro es de naturaleza diferente. En lugar del espectro continuo y multicolor de la luz del Sol, aparecen sobre un fondo oscuro continuo unas rayas brillantes de distintos colores, separadas entre sí. Cada raya o línea, si es bastante angosta, corresponde a un color determinado o, en el lenguaje ondulatorio, a una longitud de onda determinada. Por ejemplo, si en un espectro aparecen veinte líneas, cada una de ellas será designada por uno de otros tantos números distintos que expresan sus longitudes de onda. La luz emitida por los vapores de los diversos elementos posee diferentes combinaciones de rayas espectroscópicas y por ende distintas combinaciones de números que expresan las longitudes de onda que componen sus respectivos espectros. No hay dos elementos que tengan un idéntico sistema de líneas en sus espectros característicos, como no hay dos personas que tengan idénticas sus impresiones digitales. Cuando se obtuvo un catálogo más o menos completo de esas líneas, medidas con cuidado por distintos físicos, se evidenció gradualmente la existencia de ciertas leyes y fue finalmente posible representar, por una simple fórmula matemática, algunas de las columnas de números, en apariencia desconectados entre sí, que expresan las longitudes de onda de dichas líneas.

Todo lo que acabamos de decir puede ser transferido al lenguaje de los fotones. Las rayas corresponden a ciertas y determinadas longitudes de onda o, en otras palabras, a fotones de energías definidas. Los gases luminosos no emiten pues, fotones de cualquier energía, sino únicamente los característicos de la sustancia. La naturaleza limita, una vez más, la riqueza de posibilidades.

Los átomos de un elemento determinado, por ejemplo, hidrógeno, sólo pueden emitir fotones con energías definidas. Se puede decir que solamente les está permitido emitir cuantos de energía determinada, estándoles prohibidos todos los demás. Imaginemos, para simplificar, que cierto elemento emita una sola línea, o sea, fotones de energía única. El átomo es más rico en energía antes de emitir el fotón. Del principio de la conservación de la energía se sigue que el *nivel energético* del átomo es más alto antes que después de la emisión de la luz y que la diferencia entre los dos niveles debe ser igual a la energía del fotón emitido. Luego, el hecho de que un átomo de cierto elemento emita una radiación monocromática, o de una sola longitud de onda, se puede expresar de esta otra manera: en un átomo de dicho elemento sólo son permitidos dos niveles de energía, y la emisión de un fotón corresponde a la transición del átomo del nivel más alto al nivel más bajo.

Pero por regla general aparece más de una línea en los espectros de los elementos. Los fotones emitidos corresponden a muchas energías y no a una sola, O en otras palabras, debemos admitir la existencia de muchos niveles de energía atómica y que la emisión de un fotón se produce como consecuencia de la transición del átomo de uno de sus niveles a otro inferior. Pero es esencial el hecho de que no todo nivel energético es permitido, ya que no aparece en el espectro de un elemento cualquier longitud de onda, o sea, fotones de cualquier energía. Así pues, en lugar de decir que al espectro de cierto átomo le corresponden ciertas líneas, ciertas longitudes de onda, se puede decir que todo átomo posee ciertos niveles de energía perfectamente determinados y que la emisión de los cuantos de luz está asociada con la transición del átomo de un nivel a otro más bajo. Los niveles de energía de los átomos son, por regla general, discontinuos y no continuos. Otra vez vemos que las posibilidades están restringidas por la realidad.

Bohr fue quien mostró, por primera vez, por qué un elemento emitía determinadas líneas y no otras. Su teoría, formulada en 1913, da una imagen del átomo que, por lo menos en casos simples, permite calcular los espectros de los elementos, y a la nueva luz de esta teoría se presenta de pronto, con claridad y coherencia insospechadas, un gran fárrago de números aparentemente incoherentes y sin relación alguna.

La teoría de Bohr constituye un paso intermedio hacia una teoría más profunda y más general, llamada mecánica cuántica o mecánica ondulatoria. Nos proponemos en estas últimas páginas esbozar las principales ideas de esta teoría. Antes de hacerlo debemos mencionar un resultado experimental y teórico, pero de carácter más particular.

El espectro visible empieza con una cierta longitud de onda para el color violeta y termina con otra cierta longitud de onda correspondiente al color rojo. O en otras palabras, las energías de los fotones del espectro visible están siempre comprendidas entre los límites formados por las energías de los fotones rojos y violetas. Esta limitación es sólo, naturalmente, una propiedad del ojo humano. Si la diferencia de energías entre dos niveles atómicos es bastante grande, entonces se emitirá un fotón *ultravioleta*, dando una línea espectroscópica situada fuera del espectro visible. Su presencia no puede ser puesta de manifiesto por el ojo desnudo; se tiene que emplear una placa fotográfica.

Los rayos X están también compuestos de fotones de energía mucho mayor que la energía de los de la luz visible, o en otras palabras, sus longitudes de onda son mucho menores; de hecho, miles de veces menor que la de la luz visible.

¿Pero, será posible determinar experimentalmente esas longitudes de onda tan reducidas? Fue bastante difícil, ya, medir las del espectro visible. Hubimos de emplear obstáculos u orificios muy pequeños. Dos orificios hechos con la punta de un alfiler que producen la difracción de la luz ordinaria, tendrían que ser varios miles de veces menores y más cercanos entre sí para poder mostrar la difracción de los rayos X.

¿Cómo podremos determinar, entonces, la longitud de onda de estos rayos? La naturaleza misma viene en nuestra ayuda.

Un cristal es una aglomeración de átomos ordenados de una manera perfectamente regular y a distancias muy pequeñas entre sí. La figura 76 representa un modelo simple de la estructura cristalina. En lugar de pequeñas aberturas tenemos, en un cristal, obstáculos extremadamente pequeños, formados por los átomos del elemento, ordenados según una pauta absolutamente regular y separados por distancias pequeñísimas. Las distancias entre los átomos, deducidas de la teoría de la estructura cristalina, son tan pequeñas que era de esperar que mostraran el efecto de difracción de los rayos X. La experiencia probó que, en efecto, era posible difractar las ondas de los rayos X con dichos obstáculos estrechamente empaquetados y dispuestos con perfecta regularidad en las redes tridimensionales de los cristales.

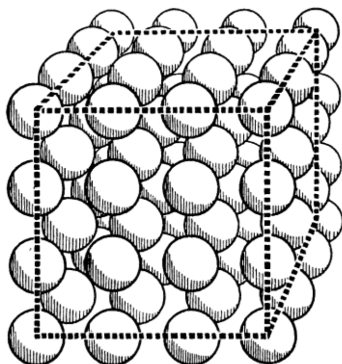
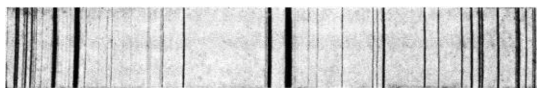


Fig. 76

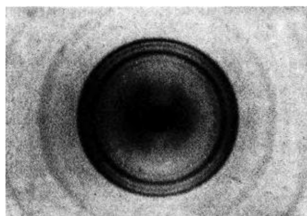
Supongamos que se registre sobre una placa fotográfica un haz de rayos X después de atravesar un cristal. Se encuentran formadas sobre la placa las tan características imágenes de difracción. Se han empleado varios métodos para estudiar los espectros de los rayos X y para deducir los datos referentes a las longitudes de onda a partir de las imágenes de difracción. Lo que hemos dicho aquí en pocas palabras, requeriría volúmenes enteros si se quisiera dar los detalles experimentales y teóricos de este asunto. En una imagen de difracción de los rayos X obtenida por uno de los varios métodos usuales para ese fin, se pueden ver los anillos claros y oscuros tan característicos de la teoría ondulatoria. En el centro es visible el rayo no difractado. Si no se hubiera puesto el cristal entre los rayos X incidentes y la placa fotográfica, se vería únicamente la mancha central oscura. A partir de fotografías de este tipo se pueden calcular las longitudes de onda de los rayos X y, por el contrario, si su longitud de onda es conocida, se pueden sacar importantes conclusiones respecto a la estructura del cristal.

Lámina 3



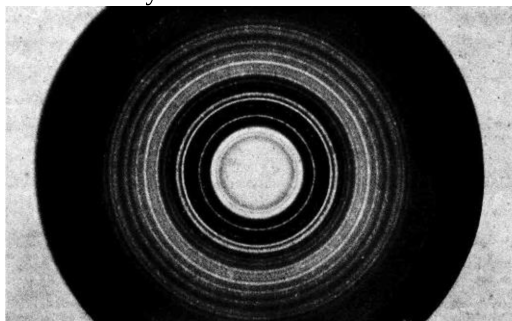
Fotografía de A. G. Shenstone

Fig. 77a. Líneas espectrales



Fotografía de Lastowiecki y Gregor

Fig. 77b. Difracción de rayos X



Fotografía de Loria y Klinger

Fig. 77c. Difracción de ondas electrónicas.

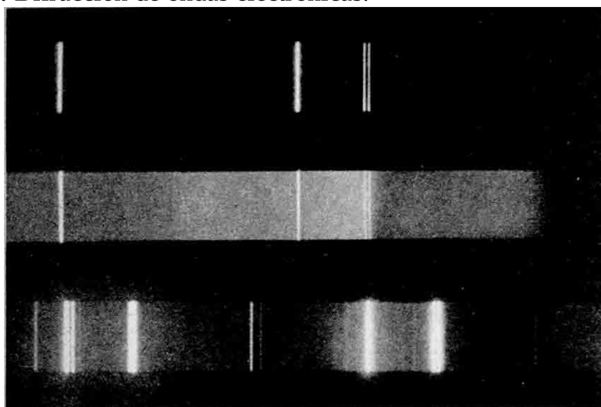


Fig. 77d. En esta fotografía se puede observar las diferencias que existen entre los espectros obtenidos al hacer pasar luz blanca a través de sustancias diferentes.

¿Cómo podemos explicarnos que aparezcan, solamente, ciertas longitudes de onda características en los espectros de los elementos?

En la física ha sucedido a menudo que el desarrollo de una analogía entre fenómenos aparentemente sin relación, ha dado origen a un verdadero progreso de la misma. En las páginas de este libro quedaron ya consignados varios casos en que se pudo aplicar, con todo éxito, a ciertas ramas de la ciencia, ideas creadas y desarrolladas en otras ramas de ella. La asociación de problemas no resueltos con otros ya resueltos puede arrojar nueva luz sobre los primeros, sugiriendo otras ideas que ayuden a solucionar las dificultades halladas. Es fácil, sin embargo, encontrar analogías superficiales, que en realidad no expresan nada; pero descubrir ciertas propiedades comunes escondidas bajo superficies exteriores de aspectos diferentes y formular, sobre esta base, una teoría nueva, constituye un trabajo de creación de un gran valor. El desarrollo de lo que se llama mecánica ondulatoria, que fue iniciado por de Broglie y Schrödinger hace menos de quince años, es un ejemplo típico del alcance de una analogía feliz y profunda que da origen a una importantísima teoría física.

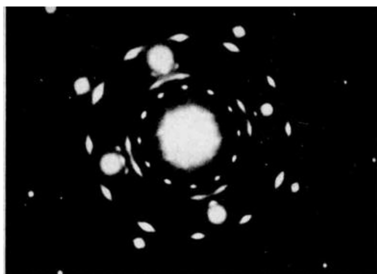


Fig. 78. Cuando se hacen pasar electrones a alta velocidad a través de una rendija, se produce un fenómeno de difracción que es característico de las ondas, lo que demuestra el carácter ondulatorio de los electrones en movimiento.

El punto de partida que lleva a este resultado es un fenómeno clásico que nada tiene que ver con la física moderna. Tomemos en las manos uno de los extremos de un tubo de goma largo y flexible o una espiral elástica muy larga y démosle un rápido movimiento rítmico de sube y baja, haciendo que dicho extremo se ponga a oscilar. Entonces, como vimos en otros casos, se crea una

onda que avanza a lo largo del tubo con cierta velocidad (fig. 79). Si imaginamos un tubo indefinidamente largo, iniciadas las ondas parciales, éstas continuarán su viaje sin fin, sin interferencia alguna.

Fig. 79



Consideremos, ahora, otro caso: los dos extremos del tubo están fijos. Si se prefiere, se puede pensar en una cuerda de un violín. ¿Qué sucede si se crea, en el tubo o cuerda, una onda, en un lugar próximo a uno de sus extremos? La onda inicia su propagación hacia el otro extremo como en el caso anterior, pero al llegar a éste, se refleja, es decir, vuelve al extremo inicial. Luego tenemos dos ondas: una creada por la oscilación y la otra, por reflexión, que se propagan en sentido opuesto e interfieren entre sí. No es difícil obtener el resultado de la interferencia de esas dos ondas y descubrir la onda resultante de su superposición que se llama *onda estacionaria*.

Las dos palabras "onda" y "estacionaria" parecen contradecirse; su reunión se justifica, sin embargo, por el resultado real de la superposición de aquellas dos ondas.

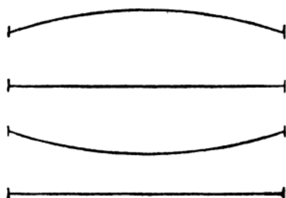


Fig. 80

El caso más sencillo de una onda estacionaria lo tenemos en el movimiento de una cuerda fija en sus dos extremos y en movimiento de vibración alrededor de su posición normal, cuatro de cuyas fases están representadas en la figura 80. Este movimiento resulta, como ya dijimos, de la superposición de dos ondas que se propagan en la misma cuerda en sentidos opuestos. La propiedad característica de este movimiento es la siguiente: sólo los dos puntos extremos están en reposo. Estos se denominan *nodos*. La onda se mantiene, por así decir, entre los dos nodos, alcanzando simultáneamente todos los puntos de la cuerda los máximos y mínimos de sus desviaciones.

Pero éste es sólo el caso más sencillo de onda estacionaria. Existen otros. Por ejemplo, se puede producir una onda estacionaria con tres nodos, uno en cada extremo y otro en el centro de la cuerda.

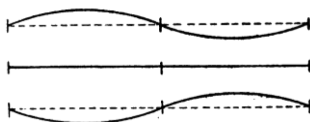
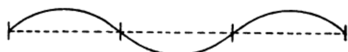


Fig. 81

En este caso hay tres puntos que están permanentemente quietos. Un vistazo a su representación (fig. 81) muestra que la longitud de su onda es igual a la mitad de la longitud de onda del ejemplo anterior, Igualmente, existen ondas estacionarias con cuatro, cinco, seis y más nodos. (Ver figura 82, correspondiente a cuatro nodos.) La longitud de onda dependerá en cada caso del número de nodos. Este número solamente puede ser entero y puede variar, por lo tanto, únicamente por saltos. Decir “el número de nodos de una onda estacionaria es igual a 3,576” no tiene sentido. Por la misma razón la longitud de onda sólo puede cambiar discontinuamente. En este problema clásico encontramos, pues, las características típicas de la teoría de los cuantos. La onda estacionaria producida por un violinista es, de hecho, todavía más complicada; es una mezcla de muchísimas ondas con dos, tres, cuatro, cinco y más nodos, y en consecuencia una superposición de varias longitudes de onda. La física posee métodos para descomponer dicha mezcla en las ondas estacionarias simples que la componen. Empleando la terminología anterior, podríamos decir que la cuerda vibrante tiene su espectro propio, exactamente como un elemento que está emitiendo su radiación. Y como en el espectro del elemento, sólo se pueden producir ciertas longitudes de onda, estando prohibidas todas las demás.

Fig. 82



Vemos así cómo se descubrió una similitud entre la cuerda vibrante y un átomo emisor de energía. Por extraña que nos pueda parecer, tratemos de llevar hacia delante esta analogía, deduciendo ulteriores conclusiones de la misma. Los átomos de todos los elementos están formados de partículas elementales, de las cuales las más livianas son los electrones y las más pesadas componen el núcleo. Un sistema tal de partículas se comporta como un diminuto instrumento acústico en el cual se producen ciertas ondas estacionarias.

Pero una onda estacionaria es el resultado de la interferencia de dos o, generalmente, más ondas simples y progresivas. Si hay algo de cierto en nuestra analogía, a una onda progresiva simple le deberá corresponder algo de constitución más sencilla que un átomo. ¿Cuál es el corpúsculo de constitución más sencilla? En nuestro mundo material nada puede ser más simple que

un electrón, una partícula elemental, sobre el que no actúen fuerzas exteriores, esto es, un electrón en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme. Se puede vislumbrar un eslabón más del encadenamiento de nuestra analogía:

un electrón en movimiento uniforme → ondas de una longitud determinada.

Esta fue la idea nueva y audaz introducida por de Broglie.

Antes se ha visto que hay fenómenos en los cuales la luz revela su carácter ondulatorio y otros en los cuales la luz revela su carácter corpuscular. Después de habernos acostumbrado a la idea de que la luz es un proceso ondulatorio encontramos, ante nuestro asombro, que en ciertos casos, por ejemplo en el efecto fotoeléctrico, se comporta como si fuera una lluvia de fotones. Ahora tenemos un estado de cosas exactamente opuesto respecto a los electrones. Nos hemos hecho a la idea de que los electrones eran partículas, cuantos elementales de electricidad y materia. Se determinó su carga y su masa. Pero si hay algo cierto en la idea de de Broglie, entonces debe haber ciertos fenómenos en los cuales la materia revele su carácter ondulatorio. De entrada, esta conclusión, obtenida siguiendo la analogía acústica, parece extraña e incomprensible. ¿Qué relación tendrá, con una onda, una partícula en movimiento?

Pero ésta no es la primera vez que nos enfrentamos en la física con una dificultad de esta clase. Ya encontramos el mismo problema en el terreno de los fenómenos luminosos.

Las ideas fundamentales desempeñan un papel esencial en la formación de una teoría física. Los libros de física están llenos de fórmulas matemáticas complicadas. Pero son los pensamientos e ideas, no las fórmulas, los que constituyen el principio de toda teoría física. Las ideas deben, después, adoptar la forma matemática de una teoría cuantitativa, para hacer posible su confrontación con la experiencia

Esto se entenderá mejor tomando como ejemplo el problema con el que estamos ocupados. La conjetura principal es que un electrón en movimiento uniforme se comportará, en ciertos fenómenos, como una onda. Supongamos que un electrón o una lluvia de electrones que tengan la misma velocidad, están en movimiento uniforme. Conocemos la masa, la carga y la velocidad de cada uno de esos electrones. Si queremos asociar, de alguna manera, un concepto de onda a uno o muchos electrones en movimiento uniforme, debemos preguntarnos ante todo: ¿cuál es la longitud de onda asociada? Esta es

una pregunta cuantitativa y se debe edificar una teoría más o menos cuantitativa que dé la respuesta buscada. Esto es, por suerte, un asunto sencillo. La simplicidad matemática de la teoría de de Broglie, que contesta a dicho interrogante, es pasmosa. En comparación con esta teoría, la técnica matemática empleada en otras teorías de la misma época era realmente sutil y complicada. Las matemáticas con que se trata el problema de las ondas de materia son extremadamente fáciles y elementales; pero las ideas fundamentales son profundas y de largo alcance.

Ha sido mostrado antes, en el caso de ondas de luz y fotones, que toda expresión formulada en el lenguaje ondulatorio puede ser trasladada al lenguaje de los fotones o corpúsculos luminosos. Vale lo mismo para las ondas electrónicas. Para el caso de electrones en movimiento uniforme, el lenguaje corpuscular ya nos es conocido. Pero toda expresión del lenguaje corpuscular puede ser traducida al lenguaje ondulatorio exactamente como en el caso de los fotones. Dos son las claves que dieron las reglas de esta traducción. La analogía entre las ondas de luz y las ondas electrónicas o entre fotones y electrones, constituye una de las claves. Se trata de usar el mismo método de traducción para la materia que el empleado para la luz. La otra clave procede de la teoría de la relatividad restringida. Las leyes de la naturaleza deben ser invariantes respecto a la transformación de Lorentz y no respecto a la transformación clásica. Estas dos claves determinan, juntas, la longitud de onda correspondiente a un electrón en movimiento. Se deduce de la teoría que un electrón que se mueve con una velocidad de unos 15.000 kilómetros por segundo, tiene una longitud de onda asociada, que es fácilmente calculable y que cae en la región de las longitudes de onda de los rayos X. Se llega así a la conclusión de que si es posible poner de manifiesto el carácter ondulatorio de la materia, tendrá que realizarse experimentalmente de forma parecida a la usada por los rayos X.

Imaginemos un haz de electrones que se mueve uniformemente con una velocidad determinada, o para usar la terminología ondulatoria, una onda electrónica homogénea, y supongamos que incide sobre un cristal muy fino el cual hace el papel de una red de difracción. Las distancias entre los obstáculos que producen la difracción en el cristal son tan pequeñas que pueden producir la difracción de rayos X. Resulta lógico esperar un efecto similar con las ondas electrónicas al atravesar la fina capa cristalina. Ahora bien, la experiencia confirma lo que constituye, indudablemente, uno de los mayores éxitos de la teoría: el fenómeno de la difracción de las ondas electrónicas. La similitud entre la difracción de una onda electrónica y un haz de rayos X es

muy pronunciada, como puede observarse comparando las fotografías correspondientes de la lámina 3. Sabemos que tal imagen nos permite determinar la longitud de onda de los rayos X. Lo mismo vale para las ondas electrónicas. La imagen de difracción de la longitud de la onda de materia, y el acuerdo cuantitativo perfecto entre la teoría y la experiencia confirman espléndidamente la concatenación de nuestro razonamiento.

Las dificultades anteriores se agrandan y profundizan con este resultado. Esto se puede aclarar con un ejemplo semejante a otro ya dado para las ondas luminosas. Un electrón disparado hacia un pequeño orificio se comportará como una onda luminosa, produciendo anillos claros y oscuros sobre una placa fotográfica. Puede haber cierta esperanza de explicar este fenómeno por una interacción entre el electrón y el borde del orificio, aun cuando esta explicación no parece ser muy prometedora. ¿Pero qué sucede en el caso de dos de esos pequeños orificios dispuestos uno al lado del otro? Como en el caso de la luz, obtenemos también aquí franjas en lugar de anillos. ¿Cómo es posible que la presencia del segundo de los orificios modifique completamente el efecto? El electrón es indivisible y parece que sólo ha de poder pasar por uno de los dos orificios.

¿Cómo podría saber un electrón que atraviese un orificio, que hay otro agujero a cierta distancia?

Antes nos preguntábamos: ¿Qué es la luz? ¿Es una lluvia de corpúsculos o una onda? Ahora preguntamos: ¿Qué es la materia? ¿Qué es un electrón? ¿Es una partícula o una onda? El electrón se comporta como una partícula cuando se mueve en un campo eléctrico o magnético exterior. Actúa como una onda al ser difractada por un cristal. Aquí tropezamos, para el cuanto elemental de materia, con la misma dificultad que encontramos para los cuantos de luz. Una de las cuestiones más fundamentales que ha originado el progreso reciente de la ciencia es cómo reconciliar las dos imágenes contradictorias de materia y onda. La formulación de una de esas dificultades fundamentales conducirá indefectiblemente al avance de la ciencia. La física ha tratado de resolver este problema. El futuro deberá decidir si la solución sugerida por la física moderna es eventual o duradera.

Si se conoce la posición y la velocidad de un punto material dado, y también qué fuerzas exteriores obran sobre él, se puede predecir su trayectoria y su velocidad futura de acuerdo a las leyes de la mecánica clásica. La afirmación: “el punto material tiene tal y tal posición y velocidad en tal y tal instante”, tiene un significado perfectamente definido en la mecánica clásica. Si esta afirmación perdiera su sentido concreto, el razonamiento que nos permitió predecir el movimiento futuro fallaría por su base.

Al principio del siglo XIX, los hombres de ciencia quisieron reducir toda la física a la acción de fuerzas de atracción y repulsión entre partículas materiales cuyas posiciones y velocidades eran bien definidas en todo momento. Recordemos cómo describíamos el movimiento al discutir la mecánica al principio de nuestra excursión por el dominio de los fenómenos físicos. Dibujábamos puntos a lo largo de una curva determinada que indicaban las posiciones exactas del móvil en ciertos instantes del tiempo y vectores tangentes que indicaban la dirección y la magnitud de las velocidades correspondientes. Esto era sencillo y convincente. Pero no se puede repetir lo mismo para los cuantos elementales de materia, esto es, los electrones, ni para los cuantos de energía, o sea, los fotones. No se puede determinar el movimiento de un fotón o de un electrón a la manera de la mecánica clásica. El ejemplo de los dos orificios hechos con la punta de un alfiler lo muestra claramente. Parece como si tanto el electrón como el fotón pasaran por los dos orificios. Es decir, es imposible explicar el efecto que se observa en dicho caso imaginando la trayectoria de un electrón o de un fotón, a la vieja manera clásica.

Nos vemos obligados, sin embargo, a admitir la existencia de Procesos elementales como el paso de los electrones o de los fotones a través de los pequeños orificios, ya que la existencia de los Cuantos elementales de materia y de energía no se puede poner en duda.

Intentemos, por lo tanto, ensayar algo diferente. Repitamos continuamente el mismo proceso elemental. Uno después de otro, los electrones son mandados en la dirección de los minúsculos orificios. Hablamos de “electrones”, pero nuestro razonamiento vale también para fotones.

El mismo proceso se repite muchas veces de una manera exactamente igual; todos los electrones tienen la misma velocidad y van todos dirigidos hacia los dos orificios. Apenas si hace falta mencionar que se trata de una

experiencia ideal que sólo puede ser imaginada, pero nunca realizada. No podemos disparar fotones o electrones, uno a uno, en instantes de tiempo dados, como quien dispara un proyectil con un cañón.

El resultado de los procesos repetidos debe ser, como antes, la formación de anillos iluminados y oscuros para el caso de un orificio, y franjas claras y oscuras, para dos orificios. Hay, sin embargo, una diferencia esencial. En el caso de un solo electrón el efecto observado era incomprensible. Se entiende más fácilmente si el proceso se repite muchas veces. En efecto, se puede argumentar así:

Donde caen muchos electrones aparecen franjas blancas; en los lugares donde inciden menos electrones las franjas son menos intensas. Una región completamente oscura significa que a ella no llega electrón alguno. No podemos aceptar, naturalmente, que todos los electrones pasan por uno solo de los dos orificios; pues, si éste fuera el caso, no podría haber la más mínima diferencia se tape o no el otro de los agujeros. Pero nosotros sabemos que tapando una de las aberturas se produce una diferencia enorme. Como esas partículas son indivisibles, no se puede imaginar que una de ellas pase por los dos orificios. El hecho de que el proceso se repita un gran número de veces señala una nueva posible explicación. Algunos de los electrones pueden pasar por uno de los orificios y los demás por el otro. No sabemos por qué un electrón dado elige un orificio y no el otro, pero el efecto resultante de muchos casos repetidos debe ser tal que ambos orificios participen en la transmisión de los electrones de la fuente a la pantalla receptora. Si nos ocupamos sólo de lo que sucede a la multitud de electrones, al repetirse la experiencia, sin preocuparnos de su comportamiento individual, se hace inteligible la diferencia entre las imágenes de anillos y las imágenes de franjas. De la discusión de una larga serie de procesos iguales, repetimos, nació una nueva idea, la de una multitud compuesta de individuos que se comportan de un modo imposible de pronosticar. No se puede predecir el curso de un electrón, pero podemos predecir el resultado neto: por ejemplo, la aparición sobre la pantalla de las franjas claras y oscuras.

Dejemos por un momento la física cuántica.

Hemos visto que en la física clásica, si se conoce la posición y la velocidad de un punto material en cierto instante y las fuerzas que actúan sobre él, se puede predecir su trayectoria futura. También vimos cómo el punto de vista mecanicista fue aplicado en la teoría cinética de la materia. Pero en esta teoría

se originó una nueva idea importante, que conviene establecer y comprender con claridad.

Un recipiente contiene cierta cantidad de gas. Si se deseara seguir el movimiento de cada una de sus partículas habría que comenzar por hallar sus estados iniciales, esto es, las posiciones y velocidades iniciales de todas las partículas. Aun en el caso de que esto fuera posible, el trabajo de anotarlas sobre un papel requeriría un tiempo mayor que la vida de un hombre, debido al enorme número de partículas que habría que considerar. Si cumplida esta labor, se pretendiera aplicar los métodos conocidos de la mecánica clásica para calcular las posiciones finales de todas las partículas, las dificultades que se encontrarían en dicho cálculo serían insuperables. Es decir, en principio es posible usar, para este caso, el método aplicado al movimiento de los planetas; pero en la práctica resultaría inútil, inaplicable, por lo cual se debe abandonar y recurrir al llamado *método estadístico*. Este método nos dispensa del conocimiento exacto de los estados iniciales. Nos hacemos indiferentes a la suerte de las partículas del gas tomadas individualmente. El problema es ahora de naturaleza diferente. Por ejemplo, no nos preguntamos: "¿Cuál es la velocidad de cada una de las partículas en tal o cual instante?", sino "¿Cuántas partículas del gas tienen una velocidad comprendida entre 1.000 y 1.100 metros por segundo?" No nos preocupamos de cada partícula individualmente. Lo que buscamos determinar son valores medios que caractericen al conjunto. Es, además, obvio que el método estadístico se puede aplicar, únicamente, a un sistema compuesto de un gran número de individuos.

Aplicando el método estadístico no es posible predecir el comportamiento de uno de los componentes de una multitud. Sólo se puede predecir *la probabilidad* de que se comporte de una manera particular. Si las leyes estadísticas expresan que una tercera parte de las partículas de una agregación tiene una velocidad comprendida entre 1.000 y 1.100 metros por segundo, ello significa que haciendo nuestras observaciones repetidas veces obtendremos, realmente, dicho promedio o, en otras palabras, que la probabilidad de encontrar una partícula dentro de dicho intervalo de velocidades, es un tercio. Igualmente, conocer el índice de natalidad de una gran comunidad no significa que sepamos si en una familia determinada nacerá una criatura. Significa el conocimiento de resultados estadísticos en los cuales se diluye la personalidad de los componentes.

Observando las placas de matrícula de una gran caravana de autos, es fácil descubrir que un tercio de sus números son divisibles por tres. Pero no es posible predecir si el número del próximo coche gozará de dicha propiedad

aritmética. Las leyes estadísticas se pueden aplicar sólo a multitudes muy numerosas, pero no a sus miembros individualmente.

Ahora estamos en condiciones de retomar el problema de los cuantos.

Las leyes de la física cuántica son de naturaleza estadística. Esto es: no se refieren a un solo sistema sino a una agregación o conjunto numeroso de sistemas idénticos; no se pueden comprobar por mediciones sobre un caso aislado, individual, sino únicamente por una serie de medidas repetidas.

La desintegración radiactiva es uno de los fenómenos naturales que la física cuántica trata de interpretar formulando leyes que expliquen la transmutación espontánea de un elemento en otro. Se sabe, por ejemplo, que en 1.600 años, la mitad de un gramo de radio se desintegrará y la otra mitad quedará sin modificación. Estamos en condiciones de predecir aproximadamente cuántos átomos de dicho elemento se desintegran durante la próxima media hora, pero no podemos afirmar, ni siquiera en nuestras descripciones teóricas, si tales o cuales átomos están condenados a la desintegración. Es decir, en base al conocimiento actual no existe posibilidad alguna de individualizar los átomos condenados a transformarse. El destino de un átomo no depende de su edad. No tenemos la más ligera idea de las leyes que gobiernan su comportamiento individual. Se han podido formular únicamente leyes que valen para agregaciones compuestas de numerosísimos átomos.

Tenemos otro caso. La luz emitida por un elemento en estado gaseoso, analizada por un espectroscopio, muestra líneas de longitudes de onda bien definidas. La aparición de un conjunto discontinuo de líneas de determinadas longitudes de onda es característica de los fenómenos atómicos en los que se manifiesta la existencia de cuantos elementales. Pero hay otro aspecto interesante del problema. Algunas de las líneas espectroscópicas son intensas; otras, en cambio, débiles. Una línea intensa significa que el átomo emitió un número relativamente grande de fotones que corresponden a la longitud de onda de dicha línea; una línea débil quiere decir que el átomo emitió un número comparativamente menor de los fotones correspondientes. La teoría nos da, otra vez, una explicación de naturaleza estadística, solamente. Como sabemos, cada línea corresponde a una transición de un nivel de energía superior a otro de energía inferior, La teoría nos habla únicamente de probabilidad de cada una de las posibles transiciones, pero nada nos dice de la transición efectiva de un átomo dado. Sin embargo, las consecuencias de esta teoría están en espléndido acuerdo con la experiencia, porque todos estos fenómenos implican un gran número de átomos y no átomos aislados.

Podría parecer que la nueva física de los cuantos se asemeja a la teoría cinética de la materia, pues ambas son de naturaleza estadística y ambas se refieren a grandes conjuntos de partículas. ¡Pero no hay tal! En esta analogía es de suma importancia ver, no sólo los aspectos similares sino, también, las diferencias. La similitud entre la teoría cinética de la materia y la física cuántica reside principalmente en el carácter estadístico de ambas. ¿Pero cuáles son los aspectos diferenciales?

Si queremos saber cuántos hombres y mujeres que viven en una ciudad tienen una edad mayor de veinte años, debemos hacer que cada uno de sus habitantes llene un formulario que tenga los siguientes encabezamientos: "hombre", "mujer", "edad". En el supuesto de que las respuestas sean correctas, obtendremos fácilmente el resultado estadístico buscado, separándolas apropiadamente y contándolas. Los nombres propios y las direcciones evidentemente no interesan. Pero nuestro conocimiento estadístico se basa a su vez en el conocimiento de un gran número de casos individuales. De igual manera, en la teoría cinética de la materia tenemos leyes de carácter estadístico, que gobiernan el conjunto de numerosas partículas, obtenidas sobre la base de leyes individuales.

Pero en la física cuántica el panorama es enteramente diferente. En esta teoría, las leyes estadísticas están dadas inmediatamente, habiéndose renunciado a las leyes individuales. Del ejemplo de un electrón o de un fotón y dos orificios pequeños, se deduce la imposibilidad de una descripción del movimiento de una partícula elemental en el espacio y en el tiempo, a la manera de la física clásica. La física cuántica abandona las leyes individuales de partículas elementales y establece *directamente* las leyes estadísticas que rigen los conjuntos numerosos. Es imposible, basándose en la física cuántica, describir las posiciones y las velocidades de una partícula elemental o predecir su trayectoria futura como en la física clásica. La física cuántica vale sólo para grandes multitudes y no para cada uno de sus componentes individuales.

No es la pura especulación ni el deseo de novedades, sino la dura necesidad la que forzó a los físicos a modificar el punto de vista clásico. Hemos expuesto las dificultades que acarrea la aplicación de la concepción clásica al fenómeno de la difracción. Podríamos citar muchos otros ejemplos en los que se encuentran dificultades de explicación análogas. En nuestro intento, siempre renovado, de comprender la realidad, nos vemos continuamente obligados a cambiar nuestro punto de vista. Pero corresponde al futuro decidir si elegimos la única salida posible o si se pudo haber encontrado una solución mejor de dichas dificultades.

Hemos tenido que abandonar la descripción de los casos individuales como sucesos objetivos en el espacio y en el tiempo; hemos tenido que introducir en la física leyes de naturaleza estadística. Estas son las características más importantes de la moderna física cuántica.

Al introducir las nuevas realidades físicas, tales como el campo electromagnético y el campo de gravitación, hemos expuesto, en términos generales, las características fundamentales de las ecuaciones que constituyen la expresión matemática de dichas ideas. Ahora haremos lo mismo con la física cuántica, refiriéndonos, sólo brevemente, a los trabajos de Bohr, de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac y Born.

Consideremos el caso de un solo electrón. Este se puede encontrar bajo la influencia de un campo electromagnético arbitrario o estar libre de toda influencia exterior. Se puede mover, por ejemplo, en el campo de un núcleo atómico o ser difractado por un cristal. La física cuántica nos enseña la manera de formular las ecuaciones matemáticas para cada uno de estos problemas.

Ya hemos visto que existe cierta similitud entre una cuerda vibrante, la membrana de un tambor, un instrumento de viento, o cualquier otro instrumento acústico, y un átomo radiante o en estado de emisión. Hay también cierta semejanza entre las ecuaciones matemáticas que corresponden a esos problemas de acústica y las ecuaciones matemáticas de la física cuántica. Pero la interpretación física de las magnitudes determinadas en los dos casos es totalmente distinta. Las magnitudes físicas que describen la cuerda vibrante y un átomo radiante tienen un significado completamente diferente, a pesar de existir ciertas analogías entre las ecuaciones correspondientes. En el caso de una cuerda, se quiere conocer la desviación de uno cualquiera de sus puntos de su posición normal, en un instante arbitrario. Conociendo la forma de la cuerda en un instante dado, conocemos cuanto deseamos. Es decir, con las ecuaciones matemáticas de la cuerda vibrante se puede calcular su desviación de la normal en cualquier instante del tiempo. Este hecho se expresa de una manera más rigurosa, como sigue: en todo momento, la desviación de la posición normal es una función de las coordenadas de la cuerda. Los puntos de la cuerda forman un continuo unidimensional y la desviación de su posición normal es una función definida en este continuo unidimensional, que se calcula con las ecuaciones de la cuerda vibrante.

Análogamente, en el caso de un electrón existe una función que tiene un valor determinado en todo punto del espacio y en todo instante del tiempo.

Llamaremos a esta función *onda de probabilidad*[7]. En la analogía que venimos estableciendo, la onda de probabilidad corresponde a la desviación de la cuerda de su posición normal. La onda de probabilidad es, en un instante dado, una función de un continuo tridimensional, mientras que, como acabamos de decir, en el caso de la cuerda, la desviación es, en un momento dado, una función de un continuo unidimensional. La onda de probabilidad, que se obtiene resolviendo las ecuaciones cuánticas, constituye la base de nuestro conocimiento de los sistemas cuánticos y nos permite dar una respuesta a todo problema de naturaleza estadística referente a tales sistemas. No nos da, sin embargo, la posición y la velocidad de un electrón en un instante del tiempo porque esto no tiene sentido en la física cuántica. Pero nos dará la probabilidad de encontrar un electrón en un lugar determinado del espacio o donde existe la máxima probabilidad de encontrarlo. El resultado no vale para una sola, sino para medidas repetidas un gran número de veces. Las ecuaciones de la física cuántica determinan la onda de probabilidad exactamente como las ecuaciones de Maxwell determinan el campo electromagnético y las ecuaciones gravitatorias determinan su campo. Las leyes de la física cuántica son también leyes estructurales. Pero el significado de los conceptos definidos por las ecuaciones de la mecánica cuántica es mucho más abstracto que el de los campos electromagnético y gravitatorio; sus ecuaciones sólo proporcionan los métodos matemáticos para resolver cuestiones de naturaleza estadística.

Hasta el presente hemos tratado sólo el caso de un electrón. Si no se tratara de un electrón, sino de una carga de un valor respetable, que contenga billones de electrones, podríamos dejar de lado la teoría cuántica y tratar el problema de acuerdo a la física precuántica. En concreto, hablando de corrientes en un alambre, de conductores cargados, de ondas electromagnéticas, podemos aplicar la física clásica, que contiene las ecuaciones de Maxwell. Pero no podemos proceder así tratando el efecto fotoeléctrico, la intensidad de las líneas espectroscópicas, la radiactividad, la difracción de las ondas electrónicas y muchísimos fenómenos más, en los que se manifiesta el carácter cuántico de la materia y de la energía. Tenemos que subir, por así decir, un piso más arriba. Mientras en la física clásica hablábamos de las posiciones y de las velocidades de una partícula, debemos considerar, ahora, las ondas de probabilidad en un continuo tridimensional.

---

[7] En el lenguaje actual de la física se la conoce como «función de onda».

La física cuántica nos da ciertas reglas que permiten tratar un problema dado, si conocemos el modo de tratar uno análogo desde el punto de vista de la física clásica.

Para una partícula elemental, un electrón o un fotón, tenemos ondas de probabilidad en un continuo tridimensional. Pero, ¿qué sucede en el caso de dos partículas que ejercen una acción mutua entre sí? No podemos tratarlas separadamente, es decir, describir cada una de ellas con una onda de probabilidad tridimensional, precisamente a causa de su interacción. Sin embargo, no es difícil adivinar cómo habrá que tratar desde el punto de vista cuántico un sistema formado por un par de partículas. Tenemos que descender ahora al piso inferior, retornar, por un momento, a la física clásica. La posición de dos partículas materiales, en un instante cualquiera, está caracterizada por seis números, tres para cada una de las partículas. Todas las posibles posiciones de dos puntos materiales forman un continuo de seis dimensiones. Si ahora volvemos al piso superior, a la física cuántica, tendremos ondas de probabilidad en un continuo de seis dimensiones. Análogamente, para tres, cuatro y más partículas, las ondas de probabilidad serán funciones en un continuo de nueve, doce y más dimensiones.

Esto indica claramente que las ondas de probabilidad son más abstractas que los campos electromagnéticos y gravitatorios que existen y se extienden en nuestro espacio de tres dimensiones. Las ondas de probabilidad tienen como fondo un continuo multidimensional que se reduce a uno tridimensional, como nuestro espacio, para el caso, más simple, de una partícula elemental. El único significado físico de la onda de probabilidad es que ella nos permite contestar a cuestiones estadísticas razonables en el caso de una o de muchas partículas elementales. Así, por ejemplo, para un electrón, podríamos preguntar cuál es la probabilidad de encontrarlo en cierto lugar del espacio. Para dos partículas, la cuestión podría plantearse así: ¿cuál es la probabilidad de encontrarlas en dos lugares determinados del espacio, en cierto instante del tiempo?

Nuestro primer paso hacia la física cuántica ha sido el abandono de la descripción de los casos elementales como sucesos objetivos en el espacio y en el tiempo. Nos hemos visto obligados a aplicar el método estadístico proporcionado por las ondas de probabilidad. Habiendo adoptado este camino nos vimos obligados a continuar por él, cada vez más hacia lo abstracto, debiendo introducir ondas de probabilidad multidimensionales para problemas de más de una partícula.

Llamemos, por brevedad, física clásica a todo aquello que no sea física cuántica; entonces podemos decir: la física clásica difiere radicalmente de la física cuántica. Aquélla pretende dar descripciones de objetos con existencia en el espacio y formular leyes que rijan sus cambios en el tiempo. Pero, repetimos, los fenómenos que revelan el carácter corpuscular y ondulatorio de la materia y de la radiación, el carácter aparentemente estadístico de fenómenos como la desintegración radiactiva, la difracción, la emisión de las líneas espectroscópicas y otros más, nos forzaron al abandono de la concepción clásica. La física cuántica no pretende dar una descripción de partículas elementales en el espacio y sus cambios en el tiempo. No hay lugar, en la física cuántica, para expresiones como la siguiente: "esta partícula es así y así, y tiene estas o aquellas propiedades". Tenemos, en cambio, expresiones como ésta: "hay tal o cual probabilidad de que una partícula sea así y así tenga estas o aquellas propiedades". Insistimos: no hay lugar en la física cuántica para leyes que rijan las variaciones, en el tiempo, de objetos tomados individualmente; en cambio poseemos leyes que dan las variaciones en el tiempo de la probabilidad. Sólo por este cambio fundamental, introducido en la física por la teoría cuántica, fue posible encontrar una explicación de la naturaleza aparentemente discontinua y estadística de los sucesos del dominio de los fenómenos en los que se revela la existencia del cuanto elemental de materia y del cuanto elemental de radiación.

Sin embargo, han surgido otros problemas, aún más difíciles, que no han podido ser resueltos aún definitivamente. En lo que sigue mencionaremos sólo algunos de estos problemas no resueltos todavía. La ciencia no es, ni será jamás, un libro terminado. Todo avance importante trae nuevas preguntas. Todo progreso revela, a la larga, nuevas y más hondas dificultades.

Ya sabemos que en el caso simple de una o muchas partículas podemos pasar del planteamiento clásico al planteamiento cuántico; de la descripción objetiva de sucesos en el espacio y el tiempo a las ondas de probabilidad. Pero no olvidemos el concepto funda- mental del campo de la física precuántica. ¿Cómo podremos describir la interacción entre el campo y los cuantos elementales de materia? Si se requiere una onda de probabilidad de treinta dimensiones, para dar una descripción cuántica de un sistema de diez partículas, entonces hará falta una onda de probabilidad de un número infinito de dimensiones para interpretar el campo desde el punto de vista de los cuantos. La transición del concepto clásico del campo al problema correspondiente de las ondas de probabilidad de la física cuántica constituye un paso que encierra dificultades muy graves. Ascender, aquí, otro piso, no es asunto fácil y todas

las tentativas hechas hasta el presente con el objeto de resolver este problema hay que considerarlas como infructuosas. Otro problema fundamental es el siguiente: en todas las discusiones respecto a la transición de la física clásica a la física cuántica hemos empleado el punto de vista prerrelativista, en el cual se considera diferentemente el espacio y el tiempo. Si quisiéramos partir de la descripción clásica, propuesta por la teoría de la relatividad, nuestro ascenso a la teoría de los cuantos parece mucho más complicado. Este es otro problema atacado por la física moderna, pero se está todavía lejos de haber dado con una solución completa y satisfactoria. Citemos, finalmente, la dificultad con que se tropezó al ensayar la formulación de una física coherente de las partículas pesadas que constituyen los núcleos atómicos. A pesar del cúmulo de datos experimentales y de los múltiples ensayos de arrojar luz sobre el problema nuclear, estamos todavía en la mayor oscuridad, en algunas de las más fundamentales cuestiones, dentro de este dominio.

No hay duda de que la física de los cuantos explica una gran variedad de hechos, alcanzando generalmente un acuerdo espléndido entre la teoría y la observación. La nueva física cuántica nos aleja más y más de la clásica concepción mecanicista, y el retorno hacia el punto de vista anterior parece, hoy más que nunca, improbable. Pero no hay duda, tampoco, de que la física de los cuantos se basa todavía sobre los dos conceptos: materia y campo. En este sentido, es una teoría dualista y no adelanta ni un solo paso el viejo problema de reducirlo todo al concepto de campo.

¿Se desenvolverá el progreso futuro a lo largo de la línea elegida por la física cuántica o es más probable que se introduzcan ideas nuevas y revolucionarias? El campo del progreso científico, ¿hará una nueva curva pronunciada como lo hizo a menudo en el pasado?

En los últimos años, todas las dificultades de la física cuántica han sido concentradas en unos pocos puntos principales. La física espera impaciente su solución. Pero no podemos prever cuándo y dónde se hará la clarificación de dichas dificultades.

FÍSICA Y REALIDAD

¿Qué conclusiones generales se pueden deducir del desarrollo de la física, que acabamos de esbozar siguiendo sólo las ideas más fundamentales?

La ciencia no es sólo una colección de leyes, un catálogo de hechos sin mutua relación. Es una creación del espíritu humano con sus ideas y conceptos libremente inventados. Las teorías físicas tratan de dar una imagen de la realidad y de establecer su relación con el amplio mundo de las impresiones sensoriales. Así pues, la única justificación de nuestras estructuras mentales está en el grado y en la forma en que las teorías logren dicha relación.

Hemos visto cómo se crearon nuevas realidades durante el progreso de la física. Pero el proceso de creación puede ser descubierto con mucha anterioridad al punto inicial de la física. Uno de los conceptos más primitivos es el de objeto. Los conceptos de un árbol, un caballo, o de cualquier otro cuerpo material, son creaciones adquiridas de la experiencia aun cuando las impresiones en que se originaron son primitivas en comparación con el mundo de los fenómenos físicos. Un gato cazando un ratón también crea, por el pensamiento, su realidad propia y primitiva. El hecho de que el gato reaccione de igual manera contra cualquier ratón que encuentre, muestra que forma conceptos y teorías que lo guían por su propio mundo de impresiones sensoriales.

"Tres árboles" es algo diferente de "dos árboles". Pero "dos árboles" no es lo mismo que "dos piedras". Los conceptos de los números puros, 2, 3, 4..., abstraídos de los objetos de los cuales se originaron, son creaciones de la mente pensante, creaciones que contribuyen a describir la realidad de nuestro mundo.

El sentir psicológico, subjetivo, del tiempo nos permite ordenar nuestras impresiones, establecer que un suceso precede a otro. Pero relacionar todo instante del tiempo con un número, mediante el empleo de un reloj, considerar el tiempo como un continuo unidimensional, ya es una invención. También lo son los conceptos de la geometría euclidiana y no-euclidiana y de nuestro espacio entendido como un continuo tridimensional.

La física empezó, en realidad, con la invención de los conceptos de masa, de fuerza y de sistema inercial. Todos estos conceptos son invenciones libres. Ellos condujeron a la formulación de la concepción mecanicista. Para el físico de principios del siglo XIX, la realidad de nuestro mundo exterior consistía en partículas entre las que actuaban simples fuerzas que dependían únicamente de la distancia que las separara. Trató de retener, tanto como le fue posible, su creencia de que sería factible explicar todos los sucesos naturales con esos conceptos fundamentales de la realidad. Las dificultades relacionadas con la desviación de una aguja magnética por una corriente eléctrica, las relacionadas con el problema de la estructura del éter, nos indujeron a crear una realidad más sutil. Así apareció el importante descubrimiento del campo

electromagnético. Hacía falta una imaginación científica intrépida para percatarse de que el comportamiento de los cuerpos pudiera dejar de ser esencial para el ordenamiento y comprensión de los sucesos, siéndolo, en cambio, el comportamiento de algo entre ellos.

Posteriores progresos han destruido los viejos conceptos y creado nuevos. El tiempo absoluto y el sistema inercial de coordenadas han sido abandonados por la teoría de la relatividad. El continuo unidimensional del tiempo y el continuo tridimensional del espacio dejaron de ser el fondo o escenario de todos los sucesos naturales, siendo sustituidos por el continuo tetradimensional del espacio-tiempo, otro invento libre con nuevas propiedades de transformación. El sistema inercial de coordenadas dejó de ser indispensable. Todo sistema de coordenadas es igualmente adecuado para la descripción de los sucesos de la naturaleza.

La teoría de los cuantos creó, también, nuevas y esenciales características de la realidad. La discontinuidad reemplazó a la continuidad. En lugar de leyes que valgan para los casos individuales, aparecieron leyes de probabilidad.

La realidad creada por la física moderna está, ciertamente, muy distante de la realidad de los primeros días. Pero el objeto de toda teoría física sigue siendo el mismo.

Con la ayuda de las teorías físicas tratamos de encontrar nuestro camino por el laberinto de los hechos observados; ordenar y entender el mundo de nuestras sensaciones. Desearíamos que los hechos observados resultaran consecuencia lógica de nuestro concepto de la realidad. Sin la creencia de que es posible asir la realidad con nuestras construcciones teóricas, sin la creencia en la armonía interior de nuestro mundo, no podría existir la ciencia. Esta creencia es, y será siempre, la motivación fundamental de toda creación científica. A través de todos nuestros esfuerzos, en cada una de las dramáticas luchas entre las concepciones viejas y las nuevas, se reconoce el eterno anhelo de comprender, la creencia firme en la armonía del mundo, creencia continuamente fortalecida por los crecientes obstáculos a la comprensión.

RESUMEN

La enorme y variada multitud de hechos del dominio de los fenómenos atómicos nos obliga, como antes, a inventar nuevos conceptos físicos. La materia tiene una estructura granular; está compuesta de partículas elementales, de cuantos elementales de materia. También poseen estructura granular —y

esto es de la máxima importancia desde el punto de vista de la teoría de los cuantos— la carga eléctrica y la energía. Los fotones son los cuantos de energía que componen la luz.

¿Es la luz una onda o una lluvia de fotones? Un haz de electrones, ¿es una lluvia de partículas elementales o una onda? Estas cuestiones fundamentales de la física proceden de la experiencia. Al tratar de contestarlas tenemos que abandonar la descripción de los sucesos atómicos como acontecimientos en el tiempo y en el espacio, tenemos que alejarnos, más todavía, del punto de vista mecanicista. La física cuántica posee leyes que rigen multitudes y no individuos. No describe propiedades, sino probabilidades, no tenemos leyes que revelen el futuro de los sistemas, sino leyes que expresan las variaciones en el tiempo de las probabilidades y que se refieren a conjuntos o agregaciones de un gran número de individuos.

LA EVOLUCION DE LA FISICA
ALBERT EINSTEIN/ LEOPOLD INFELD

«Con este libro pretendemos explicar, a grandes rasgos, las tentativas de la mente humana para encontrar una conexión entre el mundo de las ideas y el mundo de los fenómenos». Esta definición, dada por Albert Einstein y Leopold Infeld, autores del libro, puede dar una idea muy aproximada del tipo de obra que encontrará el lector.
La evolución de la física, uno de los libros clásicos de ciencia más representativos, constituye un «instrumento» imprescindible para todo estudioso de la física y una lectura amena y provechosa para el hombre de la calle.
Sin tecnicismos, el libro expone claramente el desarrollo de la física clásica, desde su génesis hasta su declive, sin olvidar, por supuesto, la teoría de la relatividad.

